

## 7. ORDENACIÓN Y PRODUCCIÓN FORESTAL

### 7.1 Ordenación Forestal

*Horacio Bown I.*

En este capítulo se discute los objetivos, conceptos, elementos, etapas, métodos e instrumentos de la ordenación forestal. Se construye brevemente la fundamentación teórica y se ilustra mediante ejemplos.

#### 7.1.1 Fundamentos de ordenación forestal

##### 7.1.1.1 Objetivos

El objetivo fundamental de la ordenación forestal consiste en asegurar que los bosques cumplan plena y continuamente sus múltiples funciones, mejorando, si fuera posible sus capacidades para lograrlo (Madrigal, 1995). De esta forma, la ordenación forestal pretende alcanzar un equilibrio entre las funciones y valores económicos, ambientales y sociales de los bosques en beneficio de las generaciones actuales y futuras.

Para lograr este objetivo, tradicionalmente se estableció el cumplimiento de tres condiciones mínimas: persistencia, máximo rendimiento y rentabilidad. La condición de persistencia se refiere a que el bosque no deje de ocupar el suelo por un periodo de tiempo significativo. Por ejemplo, en bosques de Lenga en Magallanes, el método silvicultural de cortas de protección asegura esta condición mediante la regeneración del bosque bajo un dosel protector (Corta de Regeneración). El dosel protector es removido sólo después de asegurar que la regeneración se encuentra establecida (Corta Final). La condición de persistencia requiere necesariamente considerar además la estabilidad del bosque.

La condición de máximo rendimiento implica la optimización de las diferentes utilidades que pueden obtenerse de los bosques. Ante la dificultad de optimizar producciones complejas, generalmente se ha optado por definir una producción preferente y producciones subordinadas (Madrigal, 1995). Tradicionalmente en Chile, la producción preferente para los bosques nativos ha sido la madera, pero existen presiones crecientes por otras utilidades tales como la recreación y el turismo. A modo de ejemplo, en los bosques privados de Lenga en Magallanes, la producción preferente continua siendo la madera, y así el cumplimiento de la condición de máximo

rendimiento, se logra a través de la aplicación del sistema de cortas de protección y cortas intermedias, que permiten optimizar la producción reduciendo la rotación natural de 280-300 años a 110-140 años bajo condiciones de manejo.

La condición de rentabilidad implica la previsión de oferta física del bosque en el tiempo, lo que depende directamente del modelo de organización y desarrollo del patrimonio. En un enfoque simplista orientado a la producción de madera, se asume que la biomasa acumulada en un bosque constituye el capital mientras que el crecimiento representa el interés. De esta forma, se debe utilizar la renta física hasta un nivel que no implique una descapitalización del bosque.

Tradicionalmente, la ordenación forestal se ha fundamentado en dos nociones fuertemente arraigadas. La primera de ellas es que la empresa forestal controla una superficie considerable de bosques y que sus medios de producción son lo suficientemente amplios como para no representar un factor limitante en las decisiones de la ordenación. La segunda noción es que la producción maderera debe ser controlada por un sistema orientado hacia la obtención de un flujo continuo y permanente de beneficios económicos. Estas consideraciones dieron origen a la idea de organizar un patrimonio con el fin de lograr un rendimiento máximo y sostenido (Mendoza, 1993).

La condición de rendimiento sostenido del conjunto de utilidades que generan los bosques es un objetivo de largo plazo, al que gradualmente se tiende, al avanzar la gestión del patrimonio. La condición de rendimiento sostenido implica una estructura ideal que supone una distribución equilibrada de clases de edad o dimensiones. Esto asegura una renta física sostenida en el tiempo, que supone al mismo tiempo la mantención de otros equilibrios de orden económico, social y ambiental.

El hecho que la superficie que se coseche y se regenere sea equivalente en el tiempo, asegura las condiciones más favorables para el mantenimiento del ecosistema, dado que, globalmente, el medio permanece idéntico a sí mismo a través del tiempo, cuando se cosecha y regenera la misma superficie de bosques maduros cada año. Además la mantención del equilibrio en las clases de edad permite una permanencia de paisajes y condiciones para la recreación. Finalmente, permite continuidad y mantención del mismo nivel de actividad silvícola, que implica una oferta sostenida de trabajo (Madrigal, 1995).

#### 7.1.1.2 Conceptos

La necesidad de ordenar los bosques se encuentra en el problema económico. Esto es, existen recursos escasos y necesidades insatisfechas. La ordenación entonces constituye un medio para asignar recursos forestales escasos para satisfacer las necesidades actuales y futuras de la

sociedad en su conjunto. Se requiere además que dicha asignación de recursos sea óptima de manera de cubrir tantas necesidades como sea posible.

Los bosques, como recurso natural renovable, generan una amplia variedad de bienes y servicios, algunos de ellos tangibles como madera, frutos, recreación y caza, y otros menos tangibles como la protección de los suelos y las aguas. La complejidad de compatibilizar distintas utilidades, sumado a la fragilidad del medio forestal y el periodo de planificación involucrado en la producción forestal, hace que las acciones forestales tengan efectos múltiples, algunos de largo plazo como los que ocurren sobre los suelos y otros de corto plazo como la caída repentina de árboles por viento. Como resultado de lo anterior, la producción forestal no puede conseguirse sin un esfuerzo coherente y sostenido, de manera que cada acción condiciona en gran medida las acciones futuras. Por ello, las intervenciones silviculturales que se realizan en una propiedad forestal no pueden ser improvisadas, sino que deben ser cuidadosamente organizadas en función de objetivos bien definidos (Dubourdieu, 1993).

El concepto de ordenación forestal involucra una dimensión espacial y temporal de las acciones forestales. La dimensión temporal implica conocer las acciones a seguir para cada rodal en el presente y en el futuro. La dimensión espacial implica que se deben coordinar las acciones forestales para el conjunto de rodales que constituyen una propiedad. De esta forma, la ordenación de un patrimonio forestal consistirá en programar la secuencia de intervenciones silviculturales que ocurren en el tiempo y en el espacio, para optimizar la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales y futuras, considerando restricciones de orden económico, social, ambiental y legal, entre otros. La equidad intergeneracional, esto es que las generaciones futuras tengan a lo menos los mismos recursos que las generaciones actuales, es central en ordenación forestal.

Los conceptos de rendimiento sostenido, bosque normal, bosque regulado y posibilidad de corta constituyen un buen punto de partida en ordenación forestal, debido a que simplifican la concepción de un bosque ideal. A pesar de que se trata de construcciones teóricas difíciles de alcanzar, permiten entender de mejor forma las decisiones a nivel patrimonial (McDill, 1998).

### *Rendimiento Sostenido*

El concepto de rendimiento sostenido, que corresponde a una aspiración o condición deseable, implica la mantención de un flujo permanente, constante y máximo de bienes y servicios del bosque para satisfacer las necesidades de la sociedad en forma continua (Whyte, 1994).

La ventaja de esta condición es que permite obtener periódicamente aproximadamente igual volumen de productos de similar tamaño, calidad y valor. Lo anterior permite un balance positivo

entre costos e ingresos y provee las bases para un negocio forestal estable. Además, la condición de rendimiento sostenido facilita la continuidad de empleo debido a que cada año se debe repetir las mismas actividades culturales del año anterior.

El logro de la condición de rendimiento sostenido, permite que el bosque se utilice a plena capacidad productiva. Esto implica que para un bosque de un tamaño dado se obtiene una cantidad de productos máxima y permanente. Un nivel superior de cosecha no se puede sustentar en el tiempo.

Bajo la condición de rendimiento sostenido, el bosque se mantendrá creciendo vigoroso, y usualmente bien distribuido en cuanto a clases de edad, lo que permite la mayor compatibilidad entre producción maderera y otros usos; como son, la recreación, la mantención de la vida silvestre, la protección de las cuencas y la producción de forraje, entre otras. Además supone mayor higiene y seguridad frente a incendios, insectos, enfermedades y otros agentes de daño (Whyte, 1994).

### *Bosque normal*

El bosque normal corresponde a una estructura ideal que permite la mantención de la condición de rendimiento sostenido. Es una construcción teórica ideal del bosque en el futuro que no se encuentra en la realidad. Desde la perspectiva tradicional, la ordenación debiera avanzar desde la estructura del bosque actual hacia la del bosque normal. Una vez lograda dicha estructura, el bosque proveerá automáticamente un rendimiento periódico anual igual a perpetuidad. La estructura del bosque normal se compone de superficies equivalentes de igual productividad en cada edad a lo largo de la rotación.

### *Bosque regulado*

El bosque regulado corresponde a una estructura alcanzable, en que todas las clases de edad se encuentran representadas, de manera tal que un rendimiento periódico aproximadamente igual de productos del tamaño y calidad deseados son obtenidos a perpetuidad. El bosque regulado es una relajación del concepto de bosque normal.

### *Posibilidad de corta*

La posibilidad de corta corresponde a aquel rendimiento periódico (nivel de corta) que puede ser mantenido por un largo periodo de tiempo. La posibilidad de corta depende del tamaño

del patrimonio, del nivel de inventario, de la capacidad productiva, de la silvicultura aplicada y de la estrategia de ordenación adoptada, entre otras.

Por ejemplo, para bosques de Lengua en Magallanes, se estimó la posibilidad de corta a nivel predial (10.000 ha) y a nivel regional (500.000 ha) considerando un sistema silvicultural y una estrategia de ordenación específica. A nivel predial, se encontró una posibilidad de corta de 9 mil m<sup>3</sup> de trozas aserrables y 20 mil m<sup>3</sup> de trozas astillables anuales durante los primeros cincuenta años. Posterior a ello, la posibilidad de corta podría aumentar sostenidamente como resultado de la optimización de la producción, llegando a un nivel máximo de 28 mil m<sup>3</sup> de trozas aserrables y 26 mil m<sup>3</sup> de trozas astillables anuales a partir de los cien años a lo largo del horizonte de planificación.

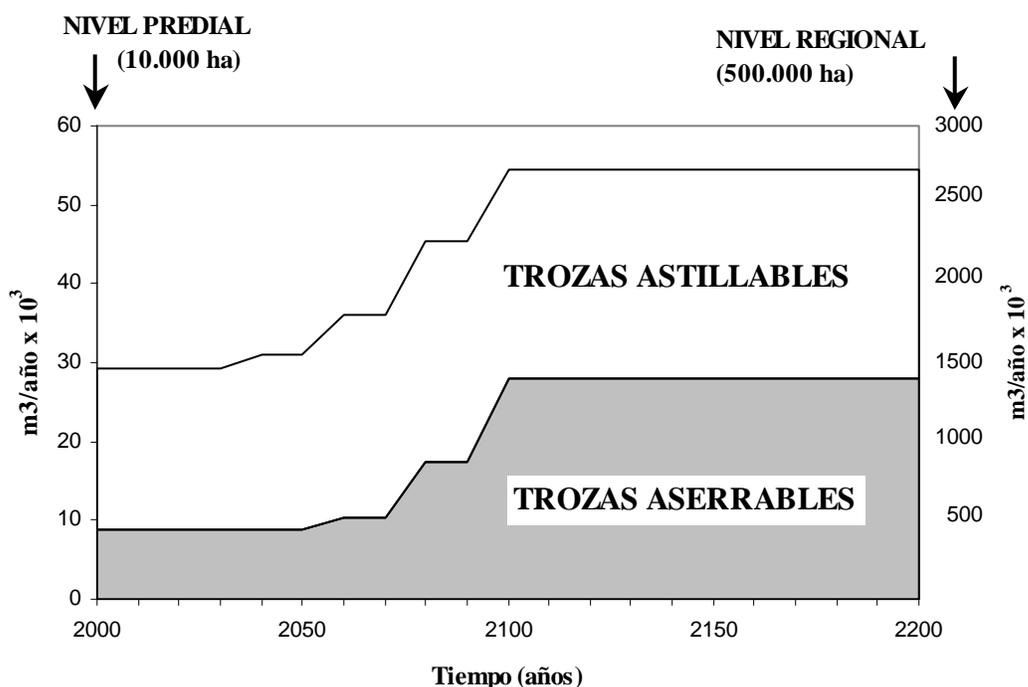


Figura 7.1.1: Posibilidad de corta a nivel predial (10.000 ha) y nivel regional (500.000 ha) en bosques de Lengua en Magallanes.

A nivel regional (500.000 ha) se estima una posibilidad de corta actual de 446.000 m<sup>3</sup> de trozas aserrables y 1.020.000 m<sup>3</sup> de trozas astillables anuales. En el largo plazo la posibilidad de corta aumenta a 1.403.000 m<sup>3</sup> de trozas aserrables y 1.318.000 m<sup>3</sup> de trozas astillables anuales. El análisis a nivel predial y regional de un caso en particular permite apreciar que la posibilidad de corta no es una constante a perpetuidad, dependiendo de la estrategia silvicultural y de ordenación adoptada.

### 7.1.1.3 Elementos

Existen tres elementos que se consideran fundamentales en ordenación forestal, que corresponden a la clasificación de la superficie de una propiedad, al desarrollo de prescripciones forestales, y a la predicción de crecimientos y rendimientos.

La clasificación de la superficie de un predio permite describir los tipos de uso que se asignan a la vegetación. A modo de ejemplo, en el cuadro 7.1.1 se presenta la clasificación de superficie por tipo de uso para un predio de 18.000 ha ubicado en la Región de Magallanes.

Cuadro 7.1.1. Clasificación de superficie por tipo de uso para un predio en la Región de Magallanes.

Uso del suelo	Descripción	Área (ha)	%	Nº Unidades
Bosque	Bosque de Lenga	11.349	63,0	939
	Bosque Húmedo Lenga-Ñirre	242	1,5	53
	Bosque de Ñirre	89	0,5	1
	Bosque de Coihue-Lenga	21	-	4
	Coníferas	10	-	1
	Subtotal	11.711	65,0	998
Sin bosque	Turba	3.517	20,0	106
	Pradera	1.932	11,0	19
	Vega	801	4,0	47
	Cuerpos de Agua	8	-	2
	Subtotal	6.258	35,0	174
Otros usos	Descubierto	8	-	9
	Planta Industrial	24	-	1
	Subtotal	32	-	10
	TOTAL	18.001	100,0	1.182

La clasificación de la superficie de una propiedad puede tener distintos niveles de resolución dependiendo de los objetivos que se persiguen. Además se puede describir progresivamente los tipos de uso avanzando de lo general a lo particular. A modo de ejemplo, en el cuadro 7.1.2 se presenta una clasificación de una parte de los bosques de Lenga del cuadro 7.1.1 (bosques de producción) considerando la intervención y calidad de los sitios.

Cuadro 7.1.2. Superficie de bosques de producción de acuerdo a clase de sitio e intervención para un predio en la Región de Magallanes.

Sitio		Área de Bosques (ha)		
		Virgenes	Intervenidos	Subtotal
Pobres	[ 12 – 16 m)	844	124	968
Regulares	[ 16 – 20 m)	2.708	3.389	6.097
Buenos	[ 20 + )	480	2.349	2.829
TOTAL		4.032	5.862	9.894

El segundo elemento fundamental en ordenación forestal corresponde al desarrollo de prescripciones forestales. Una prescripción forestal corresponde a un programa de intervenciones que se realiza a lo largo de la vida de un rodal.

A modo de ejemplo, en el cuadro 7.1.3 se presenta un programa hipotético de intervenciones para bosques adultos de Lenga en Magallanes. Se orienta a producir la máxima cantidad de trozas de alto valor en el mínimo de tiempo. Esta prescripción supone que se interviene un bosque natural maduro (desmoronamiento con envejecimiento) mediante el sistema de cortas de protección. La regeneración del bosque se logra en dos etapas, mediante una corta de regeneración y una corta final. La corta de regeneración reduce en un 50% el área basal del bosque primario favoreciendo el desarrollo de la regeneración. La corta final elimina los árboles del dosel remanente una vez que la regeneración se encuentra bien establecida. Dos años después se realiza un clareo en la regeneración eliminando aquellos individuos con problemas de sanidad, forma y vigor.

Cuadro 7.1.3. Programa hipotético de intervenciones para bosques adultos de lenga (Sitio 18m) en Magallanes, Chile

Año	Tipo de Corta	Descripción de la actividad silvícola	Aserrable (m3/ha)	Astillable (m3/ha)
1	Corta Regeneración bosque virgen adulto	Reducción del 50% del área basal.	70	140
20	Corta Final	Corta del dosel superior una vez que la regeneración se encuentra bien establecida	35	100
22	Clareo	Eliminación de individuos de mala forma y vigor en el bosque secundario	-	-
40	Raleo a desecho 1	Selección de 600 individuos, eliminación 2-3 competidores alrededor de cada uno de ellos	-	-
60	Raleo a desecho 2	Eliminación de competencia de individuos selectos sin obtener un producto de valor comercial	-	-
80	Raleo Comercial 1	Eliminación de competencia de individuos selectos obteniendo productos de valor comercial	20	60
100	Raleo Comercial 2	Eliminación de competencia de individuos selectos obteniendo productos de valor comercial	30	70
120	Corta Regeneración (*) bosque manejado	Reducción del 50% del área basal	120	100
140	Corta Final (*) bosque manejado	Corta del dosel superior una vez que la regeneración se encuentra bien establecida	160	80

(\*) los rendimientos obtenidos en el bosque natural son inferiores a los que se obtendrían una vez que el bosque se encuentre manejado

Se programa realizar cuatro raleos selectivos espaciados por veinte años. Se estima que los dos primeros raleos serán a desecho y los dos últimos comerciales. A los ciento veinte años se programa realizar la corta de regeneración sobre el bosque manejado y veinte años más tarde la corta final comenzando nuevamente el ciclo productivo.

Cada actividad silvícola puede ser caracterizada por tres elementos fundamentales que son la oportunidad, intensidad y atributos técnicos. Por ejemplo, la oportunidad del primer raleo se establece cuando los árboles alcanzan 40 años o 11 m en altura dominante. La intensidad del primer raleo se establece mediante la selección de seiscientos individuos por hectárea, eliminando alrededor de cada uno de ellos dos a tres competidores. Dentro de los atributos técnicos se establece que los individuos seleccionados deben tener buena forma, sanidad y vigor, sin mayores consideraciones por el espaciamiento.

El tercer elemento, que corresponde a la estimación de rendimientos es una parte vital de la ordenación, porque establece los retornos al conjunto de las actividades silviculturales realizadas. En el cuadro 7.1.3 se estiman los rendimientos volumétricos en trozas aserrables y trozas astillables que se obtendrían hipotéticamente a lo largo de la rotación en bosques de Lenga en Magallanes. Se aprecia que los rendimientos obtenidos en la corta de regeneración y la corta final en el bosque

manejado serán muy superiores a los obtenidos en el bosque primario debido a la selección de los mejores individuos y a la eliminación de individuos en estados de desarrollo avanzados, que presentan la mayor proporción de pérdidas volumétricas por pudrición.

#### 7.1.1.4 Etapas

Dubourdieu (1993) señala que el proceso de ordenación puede ser estructurado en cuatro etapas relativamente secuenciales. La primera etapa consiste en un conjunto de análisis que permiten establecer las potencialidades y limitaciones del recurso, y las oportunidades y amenazas del entorno en el cual se inserta la ordenación. La segunda etapa consiste en la síntesis, que considerando el conjunto de análisis, permita establecer las principales decisiones para llevar a cabo la ordenación. La tercera etapa consiste en elaborar un programa de actividades, que considerando las principales decisiones, permita ubicar espacial y temporalmente las intervenciones silviculturales y las actividades de mantenimiento e inversión. La cuarta etapa consiste en realizar un balance económico, donde se debe prever el flujo de costos e ingresos y la forma de financiar las actividades.

#### ANÁLISIS

En ordenación forestal, se considera relevante caracterizar y analizar las potencialidades y limitaciones del ambiente, del entorno socioeconómico, del medio forestal y de la infraestructura patrimonial disponible.

El análisis del ambiente consiste fundamentalmente en caracterizar los tipos forestales presentes, en términos de su dinámica sucesional y de desarrollo, de las especies de flora y fauna que requieren medidas especiales de protección, y de los riesgos naturales que inciden sobre el medio forestal. Se debe ubicar espacialmente los tipos forestales y elaborar una clave de clasificación mediante atributos simples como altitud, exposición, pendiente, suelos y especies indicadoras, entre otras.

El análisis del entorno socioeconómico consiste fundamentalmente en caracterizar las necesidades actuales y futuras del medio humano en el cual se inserta la ordenación. Se debe caracterizar la demanda de bienes y servicios en el corto, mediano y largo plazo. Este análisis permite prever como los bosques que serán objeto de la ordenación pueden contribuir a la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales y futuras.

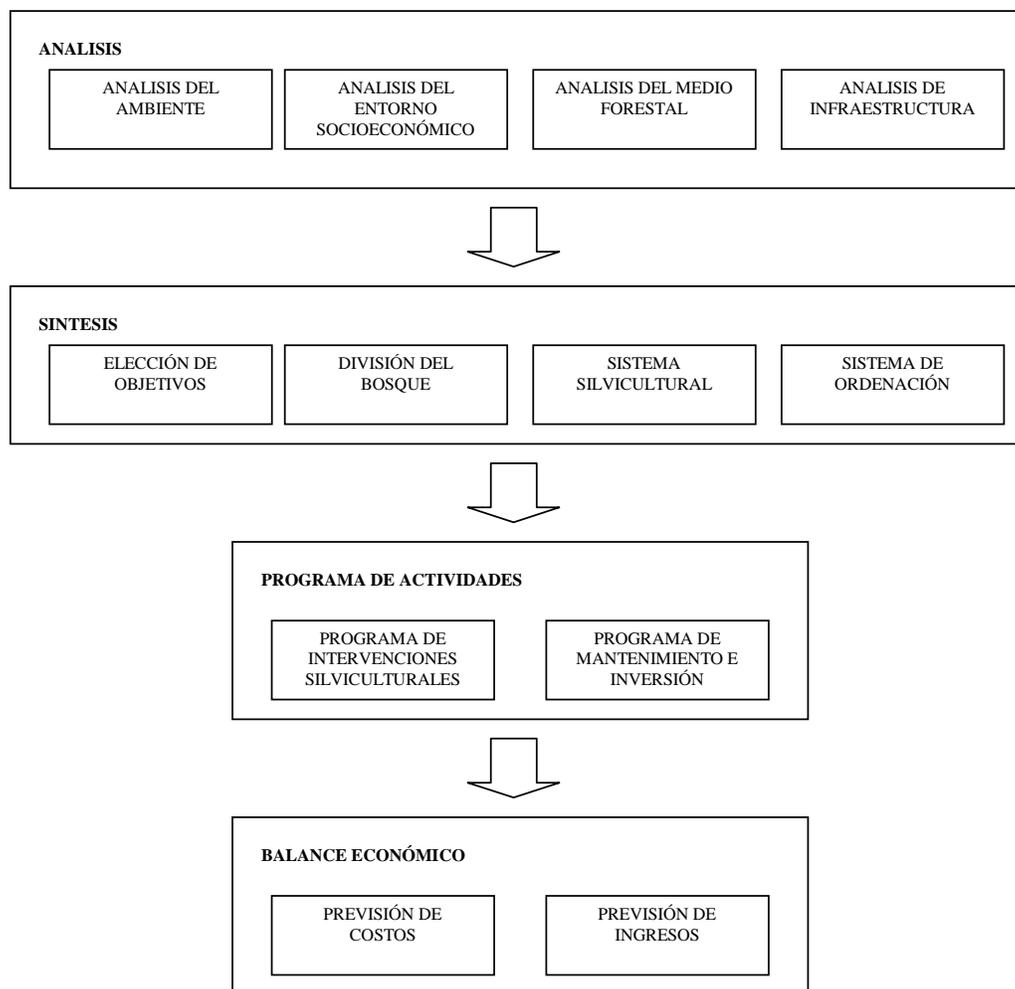


Figura 7.1.2: Etapas del proceso de ordenación forestal de acuerdo a Dubourdieu (1993)

El análisis del medio forestal consiste en caracterizar superficies, estructura, composición, calidad, producción y productividad de los bosques de una propiedad. Generalmente se fotointerpreta demarcando rodales que son recorridos en terreno y descritos mediante parámetros de fácil medición. Una vez realizada esta labor se estratifican los rodales en grupos similares en cuanto a sus características físicas, vegetacionales y de desarrollo. Estos estratos pueden ser inventariados para estimar producción, productividad y calidad. Se debe tener presente que generalmente no será posible realizar un inventario intensivo en todas las unidades cartográficas identificadas, razón por la cual se orienta el inventario hacia los estratos asumiendo que es válida para todas las unidades que lo componen. Sin embargo existe otra razón por la cual no se realizan inventarios muy intensivos para efectos de la ordenación y que se refiere al hecho que existirán rodales que serán intervenidos muchos años en el futuro cuando ya no servirán los datos colectados en el presente.

El análisis de la infraestructura consiste en identificar, cartografiar e inventariar caminos, canchas, puentes, cercos y alcantarillas, entre otras; con el objeto de proyectar los requerimientos de mantenimiento y construcción de infraestructura durante el periodo de aplicación de la ordenación. En los bosques nativos en Chile, los caminos marcaron el avance de la cosecha, por lo cual áreas de bosques vírgenes seguramente no contarán con una infraestructura caminera adecuada.

## SÍNTESIS

El desarrollo de una estrategia silvicultural y de ordenación considera una serie de decisiones de largo plazo que permitirán avanzar al bosque, desde su condición actual a su condición ideal. La primera decisión importante se refiere a la división del bosque en rodales, cantones y cuarteles. La segunda consiste en desarrollar prescripciones forestales apropiadas para cada grupo de rodales y predecir los crecimientos y rendimientos que se obtendrán al aplicarlos sobre ellos. La tercera consiste en programar las intervenciones silviculturales en el mediano y largo plazo de manera de verificar como se avanzará desde el bosque actual hacia el bosque ideal.

### *i) División del bosque*

En ordenación forestal, el bosque generalmente se divide en rodales, cantones y cuarteles. Los rodales constituyen la división elemental del bosque. Un rodal se define como una masa forestal homogénea en cuanto a características físicas, vegetacionales y de desarrollo. Las características físicas comprenden un conjunto de atributos permanentes de los terrenos forestales, incluyendo la topografía, suelos, clima e hidrología, entre otros. Las características vegetacionales comprenden un conjunto de atributos como la composición, estructura, calidad de sitio, crecimiento y rendimiento, entre otros. Las características de desarrollo comprenden un conjunto de atributos usados para caracterizar la organización, desarrollo, y accesibilidad de los terrenos forestales para uso humano; incluyendo propiedad, caminos, construcciones y límites administrativos, entre otras (Davis y Johnson, 1987).

La figura 7.1.3 muestra un ejemplo de caracterización de unidades de acuerdo a características físicas, vegetacionales y de desarrollo. Las características vegetacionales se encuentran representadas en (a) mediante la identificación de la especie, de la función y de la productividad de los bosques. Las características físicas se encuentran representadas en (b) mediante las curvas de nivel, y las de desarrollo a través de caminos y cercos.

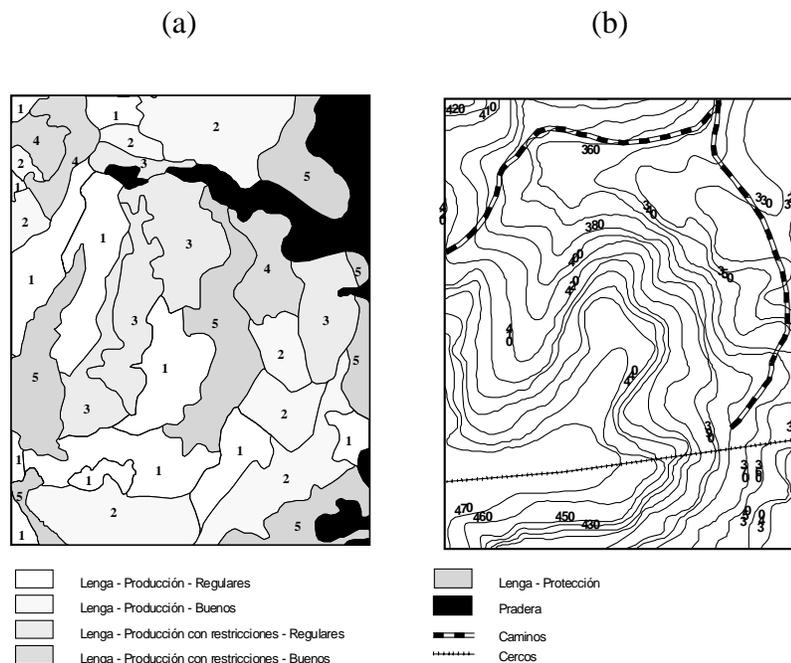


Fig. 7.1.3 Características físicas, vegetacionales y de desarrollo que permiten describir rodales.

Los cantones corresponden a unidades donde se localizan e implementan las prescripciones forestales. Generalmente se encuentran definidos por límites naturales como cursos de agua, divisorias de agua y exposición, y/o artificiales como caminos, canchas y cercos, entre otros. Comprenden en forma total o parcial uno o más rodales contiguos que serán además, dentro de lo posible, similares en cuanto a las características físicas, vegetacionales y de desarrollo.

Los cantones son necesarios porque se requiere mantener registros ordenados y coherentes de las actividades silviculturales que se realizan a lo largo del tiempo. La naturaleza permanente y fácilmente identificable de los cantones permite que la ordenación se realice en forma relativamente independiente de la administración de turno.

Existen también razones de escala que justifican la existencia de los cantones. Generalmente se requerirá un área mínima de intervención para hacer que las operaciones sean económicamente factibles. Además, al existir límites claros se facilita el monitoreo y control de las actividades. En el cuadro 7.1.4 se presenta un ejemplo del tipo de registro que se debiera mantener para los rodales que componen un cantón.

Cuadro 7.1.4. Ejemplo de un sistema de registro de rodales para efectos de instrumentalizar la ordenación de una propiedad forestal

Descripción del rodal	
Localización	Rodal 124, Sector 4
Área	8 ha
Clasificación	Bosque virgen en desmoronamiento con crecimiento óptimo final
Edad	100-140 años
Cobertura de copas	100%
Volumen Bruto	500 m <sup>3</sup> /ha
Sitio (m)	23m
Incremento medio anual	4.5 m <sup>3</sup> /ha/año
Forma	Árboles juveniles de buena forma y libre de defectos
Prescripciones	
Próxima intervención	Raleo comercial, extracción del 30% área basal, concentrar potencial del sitio en mejores individuos
Volumen de corta	Sobre un volumen bruto actual de 500 m <sup>3</sup> /ha se proyecta extraer 150 m <sup>3</sup> /ha brutos, de los cuales 40 m <sup>3</sup> /ha corresponden a trozas aserrables y 60 m <sup>3</sup> /ha a trozas astillables
Manejo del rodal	Sobre una rotación proyectada de 120 años, el rodal debe ser raleado en 2002 y regenerado mediante cortas de regeneración en 2021.
Registro de operaciones	
May 1993	Inventario: área basal 70 m <sup>2</sup> /ha, vol. Bruto 500 m <sup>3</sup> /ha, número árboles por hectárea 1200 Cof + 100 Desm.
Dic 2001	Raleo comercial. Se extrajo 37 m <sup>3</sup> /ha trozas aserrables y 50 m <sup>3</sup> /ha de trozas astillables. Quedaron 600 árb/ha de buena calidad bien distribuidos
Feb 2021	Corta de regeneración. Reducir área basal al 50%. Construir huellas de madereo.
Mar 2021	Establecer parcelas de regeneración. Se requiere más de 3.000 plantas bien distribuidas al final de 10 años.
May 2041	Corta final. Cosechar dosel remanente desde huellas de madereo.
May 2043	Clareo en bosque secundario. Eliminar individuos dañados y de mala forma.
Ago 2061	Raleo selectivo. Seleccionar 600 árb/ha eliminar 2-3 competidores a cada uno.

Un cuartel corresponde a una agrupación de cantones, no necesariamente contiguos, que constituye una unidad de objetivos y de tratamientos. Los cantones que componen un cuartel son similares en cuanto a las características físicas, vegetacionales y de desarrollo, aún cuando se encuentran generalmente dispersos en cuanto a las clases de edad. Así, por ejemplo, todos aquellos cantones de un mismo tipo forestal orientados preferentemente a la producción y que no presenten grandes limitaciones físicas ni ecológicas podrán ser agrupados en un cuartel.

#### *ii) Elección de la estrategia de ordenación*

La aplicación directa de los tratamientos silviculturales que correspondan en cada rodal no garantiza el cumplimiento de los objetivos de la ordenación. Esto es porque se requiere coordinar las intervenciones para el patrimonio en su conjunto. Así, la estrategia de ordenación consistirá en

un conjunto de lineamientos sobre el desarrollo del patrimonio en el tiempo, orientados a satisfacer los objetivos de la ordenación.

La estrategia de ordenación consistirá en elegir el periodo de aplicación de la ordenación, la longitud de la rotación, las superficies intervenidas en cada periodo por grupo de tratamiento y el patrón espacial de avance de las intervenciones, entre otros. Corresponde a la política global que detalla como se conducirá el bosque actual hacia el bosque ideal.

#### PROGRAMA DE INTERVENCIONES

El programa de intervenciones establece cómo, cuándo y dónde se realizarán las actividades silviculturales durante el periodo de aplicación de la ordenación. En el cuadro 7.1.5, se presenta un programa hipotético de intervenciones para el primero de cuatro quinquenios en una propiedad forestal.

Cuadro 7.1.5. Resumen de intervenciones por grupo de tratamiento para una propiedad forestal en la Región de Magallanes.

Estructura	Superficie (ha)	Nº Rodales	Tratamientos (2002-2006)	Rodales
1 Bosque manejado con cortas de regeneración	35	3	Corta Final Clareo 2 años después	441, 836, 838
2 Bosque Floreado Dosel > 60% Reg. Inicial (< 0.5 m)	46	6	Corta de Regeneración Complementaria	276, 727, 737, 738, 960, 1098
2 Bosque Floreado Dosel > 60% Reg. Inicial (<0.5 m)	44	6	Corta de Pre-cosecha	109, 707, 835, 881, 906, 950
3 Bosque Floreado Dosel < 60% Regeneración avanzada a Monte Bravo (0.5 – 5 m)	1.075	55	Corta Final Clareo 2 años después	1, 6, 7, 8, 9, 16, 23, 25, 28, 94 97, 112, 120, 179, 430, 431, 432, 446, 448, 450, 656, 660, 702, 704, 713, 718, 723, 728, 734, 739, 742, 813, 814, 843, 844, 850, 855, 876, 908, 910, 937, 939, 943, 945, 947, 949, 951, 953, 957, 1099, 1130, 1131, 1187, 1198, 1200
4 Bosque Floreado Dosel < 60% Latizal bajo (5-12 m)	89	4	Corta Final Raleo selectivo 2 años después	111, 639, 733, 1097
5 Bosques vírgenes en crecimiento óptimo inicial (Juvenil Inicial)	136	13	Raleo	24, 27, 96, 443, 657, 658, 659, 716, 719, 724, 741, 894, 940
6 Bosques vírgenes en crecimiento óptimo final (Juvenil Final)	277	21	Raleo	99, 105, 440, 661, 662, 703, 712, 715, 735, 746, 749, 811, 834, 847, 849, 856, 877, 878, 941, 956, 1100
7 Bosque Virgen (Adulto)	139	11	Corta de Precosecha	4, 5, 77, 452, 740, 744, 853, 879, 944, 954, 958
<b>TOTAL</b>	<b>1.841</b>	<b>119</b>		

Esta programación se traduce en que para cada rodal se conoce exactamente en que periodo de tiempo se intervendrá y con qué tratamiento. La información se sintetiza al establecer grupos de rodales similares que serán intervenidos de acuerdo al mismo tratamiento.

#### BALANCE ECONÓMICO

Como resultado de la adopción de la estrategia de ordenación se generan ingresos y costos. Los ingresos se generan como resultado de la comercialización de los bienes y servicios que genera el bosque. Los costos se generan como resultado de la ejecución de las actividades silviculturales y del programa de mantenimiento e infraestructura. La ordenación requiere que exista un balance positivo entre costos e ingresos, a menos que exista la voluntad del estado o de terceros de financiar la diferencia. A modo de ejemplo, en la figura 7.1.4 se presenta el flujo de volúmenes, ingresos y costos que generan como resultado de aplicar una estrategia silvícola y de ordenación hipotética en una propiedad forestal.

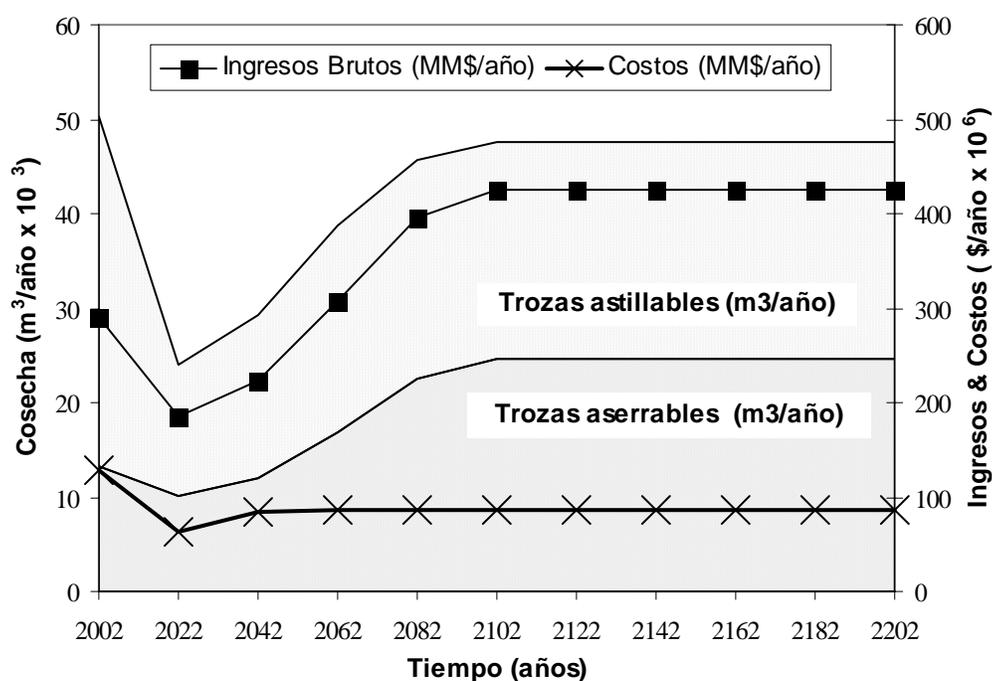


Figura 7.1.4: Flujo de volúmenes, ingresos y costos como resultado de aplicar una estrategia de ordenación específica en una propiedad forestal.

La estrategia de ordenación seleccionada incide directamente sobre el flujo de ingresos y costos, por lo que se debieran analizar la influencia de distintas estrategias de ordenación sobre el

balance económico del ejercicio. La comparación de distintas estrategias de ordenación puede realizarse a través del Valor Presente Neto (VPN).

### 7.1.2. Métodos clásicos de ordenación forestal

Los métodos clásicos de ordenación forestal permiten transformar un bosque con una distribución de edades desbalanceada a una balanceada. Los métodos básicos se pueden dividir en dos categorías: regulación por área y regulación por volumen. Ambos enfoques se basan en cortar un cierto nivel de área o volumen para avanzar paulatinamente desde el bosque actual al bosque regulado. Una vez que el bosque se encuentra regulado todos los enfoques se hacen equivalentes.

#### 7.1.2.1 Regulación por área

Aunque el método es válido tanto para bosques regulares como irregulares, se encuentra más relacionado a los primeros. En ambos casos el propósito fundamental es transformar la organización actual del bosque para lograr la normalidad en el mínimo de tiempo. Las condiciones requeridas para esta transformación son:

- A partir del momento en que se inicien las labores de regeneración, el bosque secundario deberá recibir un régimen silvícola óptimo encaminado al logro del máximo rendimiento.
- En cada periodo de ordenación se regenera la misma superficie, de manera tal que transcurrida una rotación la totalidad de la superficie habrá sido regenerada.
- Para transformar el bosque actual en un bosque equilibrado en las clases de edad (bosque regulado), el método propone cosechar y regenerar la misma superficie cada año considerando como principal parámetro la longitud de la rotación (lapso de tiempo entre la regeneración del bosque y su cosecha).

La fórmula de cálculo de la superficie a regenerar en cada año o periodo de ordenación consiste entonces en dividir la superficie total por la rotación y expandirla al periodo de ordenación.

$$A_r = \frac{A}{R} \times p$$

donde;

$A_r$  : Área cosechada y regenerada en el periodo de aplicación de la ordenación

$A$  : Superficie del cuartel

- R : Longitud de la rotación  
 p : Periodo de aplicación de la ordenación

**Ejemplo 7.1.1.** El predio Monte Alto posee una superficie de 18.000 ha, de las cuales 11.711 ha corresponden a bosques mayoritariamente de Lengua (*Nothofagus pumilio*). Se ubica en la Comuna de Puerto Natales, Provincia de Última Esperanza, XII Región. Para efectos de la ordenación del predio se identificaron tres cuarteles, dos de producción y uno de protección. El primer cuartel (8.926 ha) corresponden a bosques de Lengua sobre 16 m, que serán manejados con una rotación de 120 años. El segundo cuartel (968 ha) corresponden a bosques de Lengua entre 12 y 15 m, que serán manejados con una rotación de 140 años. El tercer cuartel (1.455 ha) corresponde mayoritariamente a bosques de Lengua bajo 12 m y bosques húmedos de Lengua-Ñirre de protección que no serán intervenidos. Calcular la superficie a cosechar y regenerar para cada cuartel considerando periodos de ordenación de 20 años.

### Resolución 7.1.1.

Cuartel I. Bosques de Lengua de producción sobre 16 m (8.926 ha)

$$A_r^I = \frac{A}{R} \times p = \frac{8.926 \text{ ha}}{120 \text{ años}} \times 20 \text{ años} = 1.488 \text{ ha / periodo}$$

Cuartel II. Bosques de Lengua de producción entre 12 y 15 m (968 ha)

$$A_r^{II} = \frac{A}{R} \times p = \frac{968 \text{ ha}}{140 \text{ años}} \times 20 \text{ años} = 138 \text{ ha / periodo}$$

Cuartel III. Bosques de protección (1.455 ha)

No será intervenido.

### -Fin Ejemplo-

El método de regulación por área posee ventajas y desventajas. La principal ventaja del método es la certeza de que se logrará la regulación del patrimonio en un periodo igual o inferior a una rotación. La principal desventaja es que generalmente se obtiene un flujo desigual de producto a lo largo de la primera rotación, estabilizándose sólo a partir de la segunda (Davis y Johnson, 1987).

### DISTRIBUCIÓN DE CLASES DE EDAD

Para llevar a cabo la ordenación, se requiere conocer cómo se distribuye la superficie de un patrimonio forestal en las distintas clases de edad. Además, si el patrimonio se compone de varios cuarteles será necesario conocer la distribución de clases de edad en cada uno de ellos.

Una distribución de clases de edad corresponde a las frecuencias en superficie de las edades presentes. Generalmente las edades se agregan en clases de igual intervalo para simplificar el análisis y se representan mediante histogramas. En la figura 7.1.5 se presenta el histograma de edades para un cuartel de 11.000 ha considerando clases de edad de 20 años.

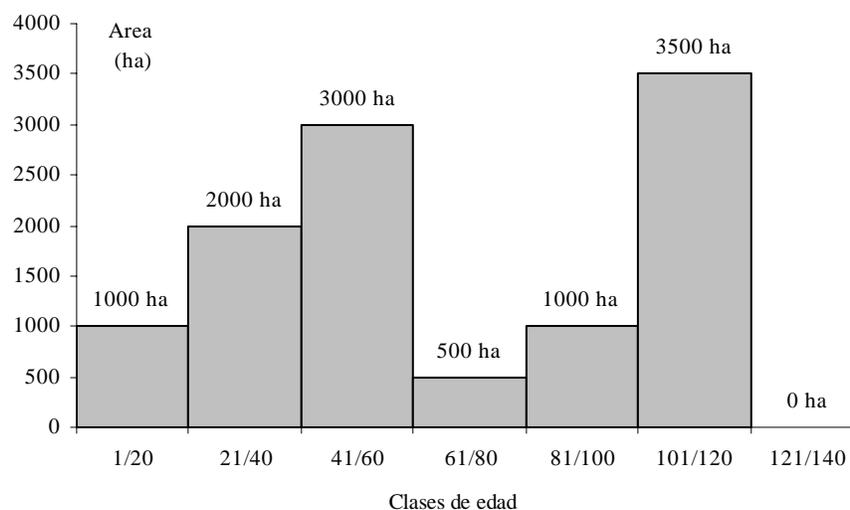


Fig. 7.1.5: Histograma de edades para un patrimonio ejemplo de 11.000 ha

Los histogramas permiten describir la estructura patrimonial en un punto en el tiempo. De esta forma, la evolución de un patrimonio se puede representar a través de una secuencia de histogramas o distribuciones de clases de edad, que reflejan una estrategia de ordenación específica.

#### PROYECCIÓN DE DISTRIBUCIONES DE CLASES DE EDAD

La proyección de distribuciones de clases de edad es un proceso que consiste en transformar una distribución actual en una distribución futura considerando una estrategia de ordenación específica. Dicha estrategia de ordenación se traduce en que el patrimonio será parcial o totalmente intervenido, por lo que la superficie se moverá de clase de edad. En el caso más sencillo, cada hectárea puede ser cosechada o no. Si es cosechada debiera ser inmediatamente regenerada por lo cual pasa a formar parte de la primera clase de edad en el siguiente periodo. Si no es cosechada, pasa a formar parte de la siguiente clase de edad en el siguiente periodo debido a que envejece.

Para realizar la proyección de distribuciones de clases de edad se deben tomar algunas decisiones y realizar algunos supuestos. Entre las decisiones se encuentra la elección del intervalo de proyección y de la estrategia de ordenación. El intervalo de proyección generalmente se hace coincidente con el intervalo de las clases de edad, pero ambos debieran ser elegidos en función del nivel de detalle requerido por el ordenador. La elección de la estrategia de ordenación, en el caso más sencillo, consistirá en elegir una longitud de rotación, calcular la superficie a regenerar y cosechar comenzando por las clases de edad superiores hacia las inferiores.

Uno de supuestos más importantes es la distribución de la superficie en cada clase de edad, que generalmente se asume uniforme. Sin embargo, también se puede asumir que la superficie se concentra en la mitad de la clase o que los rodales que la componen mantienen sus edades individuales y son proyectados también en forma individual. Para los ejemplos que se presentan se asume que la superficie se distribuye uniformemente en cada clase de edad.

Una vez explicitadas las decisiones y los supuestos, se procede a proyectar la distribución de clases de edad. Los pasos a seguir para lograr la condición de normalidad son los siguientes:

- i) Seleccionar la rotación deseada para el bosque regulado.
- ii) Calcular el número de hectáreas que serán cosechadas cada periodo, dividiendo la superficie total del cuartel por la edad de rotación multiplicado por la amplitud del periodo de ordenación.
- iii) Proyectar la distribución de clases de edad, de periodo en periodo moviendo la superficie cosechada a la primera clase de edad y las superficies no cosechadas a la siguiente clase de edad en el siguiente periodo.
- iv) Calcular el volumen cosechado, multiplicando el rendimiento por hectárea por el área cosechada. Además se deben agregar los volúmenes de las cortas intermedias si existieran.
- v) Repetir los pasos 3 y 4 hasta que la distribución de clases de edad proyectada se encuentre regulada.

**Ejemplo 7.1.2.** Considere que la estructura actual de un patrimonio forestal viene dado por la distribución de frecuencias e histograma de la figura 7.1.5 proyectar la distribución de clases de edad a través del método de regulación por área, considerando una rotación de 120 años.

**Resolución 7.1.2** El primer paso para proyectar las distribuciones de clases de edad consiste en calcular la superficie a regenerar en cada periodo de ordenación. Este valor se calcula a continuación considerando una superficie total de 11.000 ha, una rotación de 120 años y periodos de 20 años:

$$A_r = \frac{A}{R} \times p = \frac{11.000 \text{ ha}}{120 \text{ años}} \times 20 \text{ años} = 1.833 \text{ ha / periodo}$$

Una vez conocida la superficie que será regenerada en cada periodo (1.833 ha), se procede a proyectar las clases de edad considerando una política de corta específica. Esta política consiste en cubrir la superficie a cosechar en cada periodo (1.833 ha) comenzando desde la última clase de edad y avanzando hacia las menores (cuadro 7.1.6).

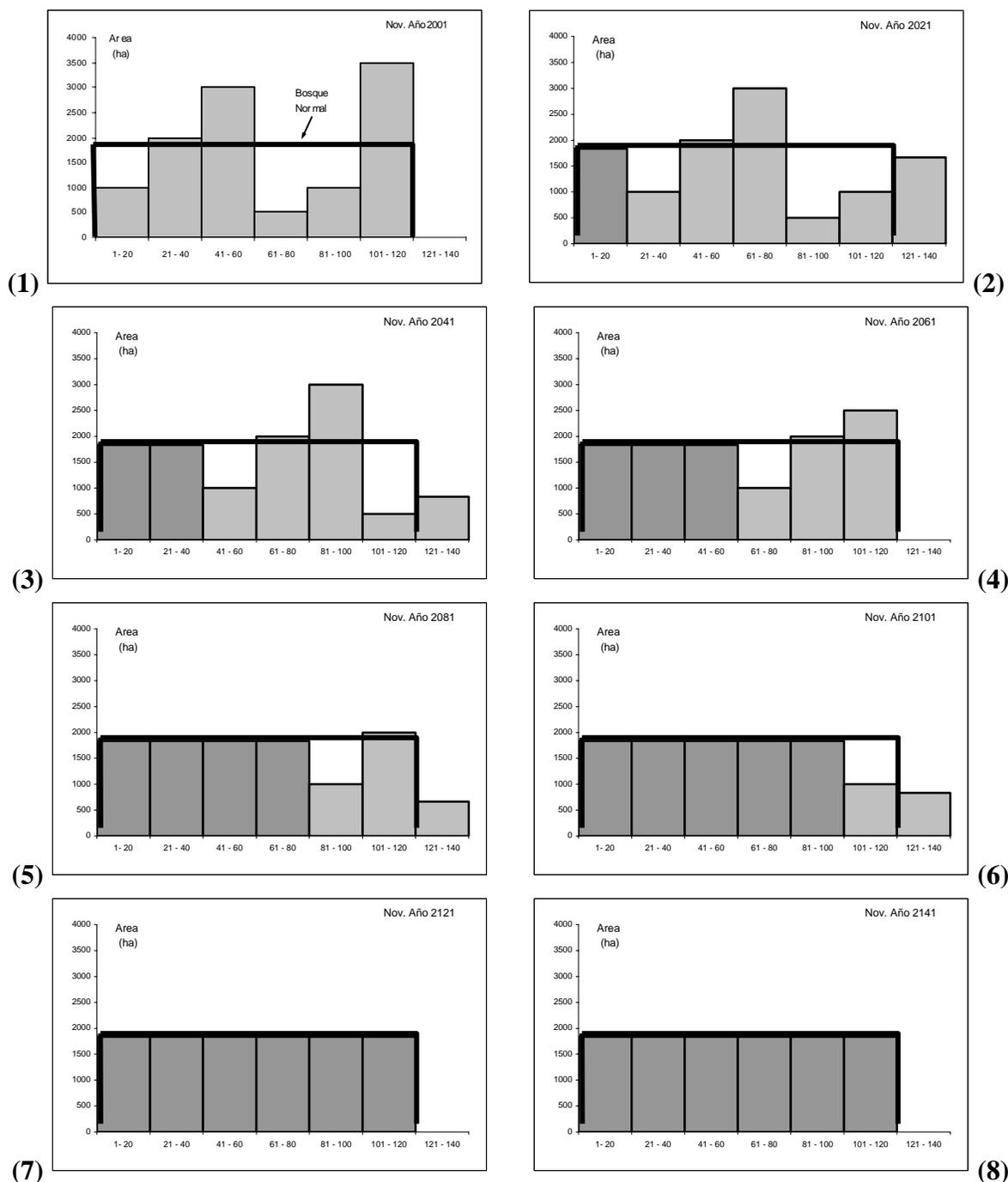


Figura 7.1.6: Proyección de distribuciones de edades mediante el método de regulación por área (MRA)

Para simplificar el proceso se construye una tabla de superficies remanentes (cuadro 7.1.6a) y una tabla de superficies cosechadas (cuadro 7.1.6b). La tabla de superficies remanentes representa las distribuciones de clases de edad al final de cada periodo. La tabla de superficies cosechadas muestra para cada periodo la superficie cortada en cada clase de edad.

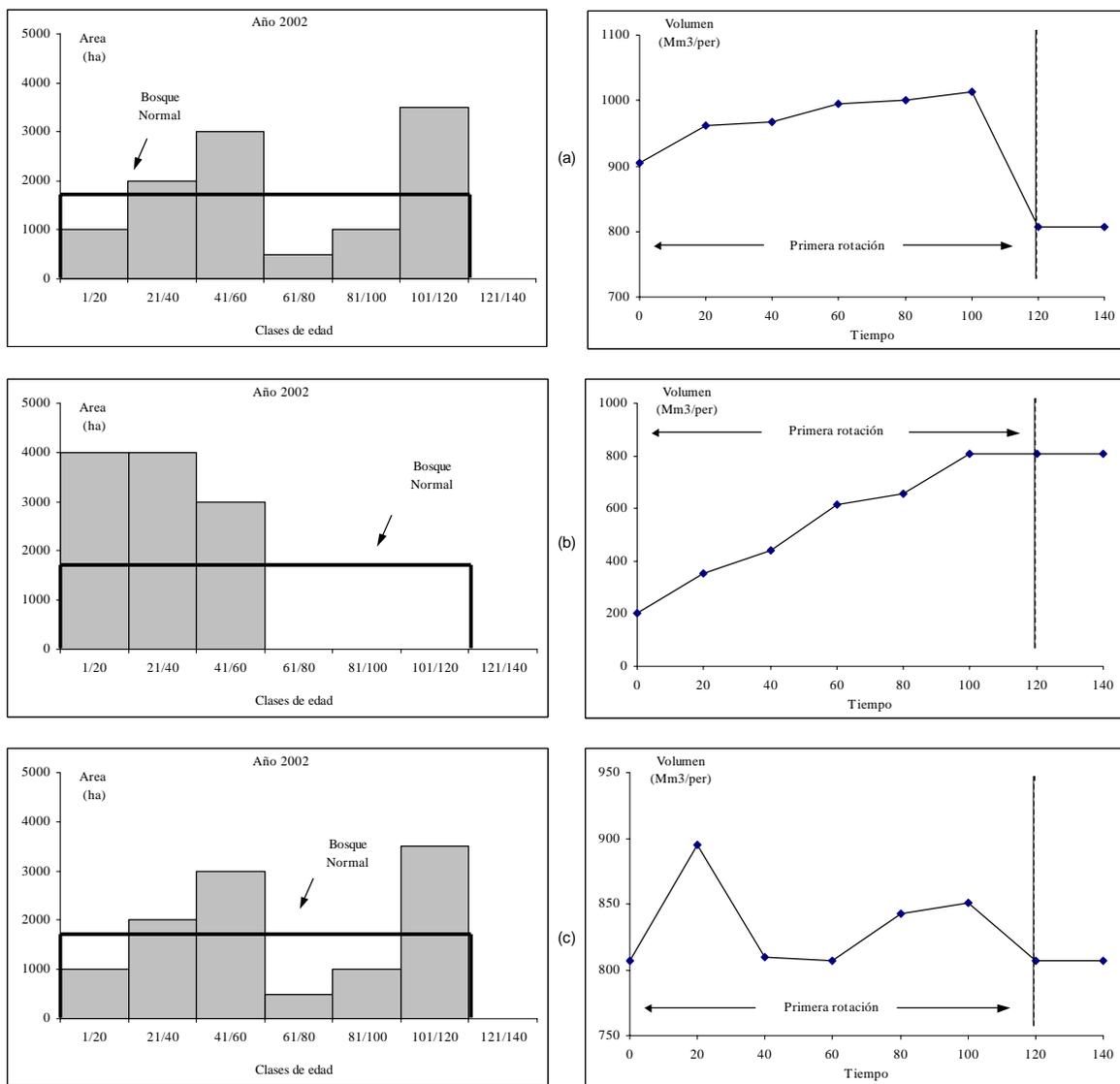
El cuadro 7.1.6 presenta la distribución de edades a lo largo de un horizonte de planificación de 200 años. Por conveniencia, tanto edades como tiempo han sido agregados en

intervalos de 20 años. La figura 7.1.6 muestra la evolución de las distribuciones de clases de edad a lo largo del horizonte de planificación, de acuerdo a la política de ordenación adoptada.

Para proyectar la distribución de clases de edad desde el año 0 al año 20, se debe cosechar 1.833 ha de la mayor clase de edad (3.500 ha). Como resultado de ello, se debe anotar en la tabla de superficies cosechadas, 1.833 ha en la clase de edad 101-120 en el primer periodo. La diferencia entre la superficie remanente (3.500 ha) y la superficie cosechada (1.833), se mueve a la siguiente clase de edad en el próximo periodo como resultado de que no fue cosechada (1.667 ha). La superficie cosechada (1.833 ha) debe ser regenerada inmediatamente por lo que pasa a formar la primera clase de edad al final del primer periodo. Las superficies no cosechadas se mueven a la siguiente clase de edad al final del primer periodo.

El proceso continúa con la misma dinámica hasta el final del horizonte de planificación. Siguiendo este modelo, el bosque alcanzaría la condición de normalidad al final de la primera rotación (1.833 ha en cada clase de edad). De este ejemplo, se deriva que la regulación por área demora una rotación en lograr el bosque regulado, pero al costo de no obtener un flujo de madera constante a lo largo de la misma (Figura 7.1.7 c). Una vez que se logra el bosque regulado, se cosecha exactamente el crecimiento del bosque en el período, el que además es una constante a perpetuidad.

**-Fin Ejemplo-**



Ecuación de rendimiento utilizada:  $Y = 565 (1 - e^{-0.03 X})^9$  donde Y = rendimiento ( $m^3/ha$ ); X = edad (años)

Fig. 7.1.7. Fluctuaciones en el flujo de madera a lo largo de la primera rotación a partir de distintos histogramas iniciales (11.000 ha)

En la figura 7.1.7 se presenta los flujos de madera a lo largo de 200 años para tres distribuciones de clases de edad desbalanceadas, sometidas a regulación por área considerando una rotación de 120 años. En la figura 7.1.7a se presenta un bosque con mayor proporción de superficie de las clases de edad superiores, por lo que el flujo de madera durante la primera rotación será superior al que se obtendrá una vez que el bosque alcance la condición de normalidad. En la figura 7.1.7b se presenta un bosque con una mayor proporción de superficie en las clases de edad inferiores, por lo que el flujo de madera durante la primera rotación será inferior al que se obtendrá una vez que el bosque alcance la condición de normalidad. Independiente de la condición inicial del

patrimonio (figura 7.1.7 a, b y c), los volúmenes cosechados anualmente variarán a lo largo de la primera rotación, estabilizándose a partir de la segunda.

Existen algunas ventajas que hicieron de la regulación por área una técnica frecuentemente utilizada. Primero, se trata de una técnica sencilla donde se cosecha una cierta superficie que se puede calcular mediante matemáticas elementales. Además, es fácil de identificar en terreno que superficie debe ser cosechada, especialmente al utilizar una política de corta sencilla, como por ejemplo: “cosechar los rodales de mayor edad primero”. Finalmente, se tiene la seguridad que mediante esta técnica se logrará la regulación del bosque al cabo de una rotación. Esta técnica ha sido particularmente apropiada para el manejo de plantaciones y bosques regulares (Leuschner, 1992)

El aspecto más relevante en este método, es que el logro de un bosque normal es la regla prioritaria y su importancia se antepone a cualquier otro objetivo. El elemento fundamental en bosques regulares es poder establecer en cada periodo, superficies equivalentes de regeneración, que subsecuentemente serán cultivadas para obtener un máximo rendimiento (Mendoza, 1993).

La regulación por área posee también desventajas. Una de las más serias, es que su aplicación estricta puede conducir a grandes fluctuaciones en los volúmenes cosechados durante la primera rotación. Esta fluctuación será teóricamente eliminada a partir de la segunda rotación. Sin embargo, se deberán hacer ajustes debido a las diferencias en la calidad de los sitios. Una segunda desventaja es que la regulación por área debe ser combinada con algún tipo de control por volumen al aplicarlo en bosques irregulares (Leuschner, 1992).

Sin embargo, dado que el método de regulación por área es indiferente a la estructura inicial de los rodales, es posible establecer mecanismos de asignación que cumpliendo con la meta de regenerar una superficie equivalente cada año, controlen en cierta medida el flujo de productos de la cosecha (Mendoza, 1993).

#### 7.1.2.2 Regulación por volumen

La aplicación del método de regulación por área genera un volumen fluctuante de cosecha durante la primera rotación. Esto se debe a que el volumen es una consecuencia de cosechar y regenerar una cierta superficie en cada periodo. Por el contrario, en regulación por volumen la decisión principal consiste en determinar cuanto volumen cosechar en forma periódica para lograr la regulación del bosque. Una vez determinado el volumen a cosechar, y como consecuencia de ello, se determina la superficie requerida para satisfacer dicho volumen (Davis y Johnson, 1987, McDill, 1993).

En el enfoque de regulación por volumen, el mismo volumen es cosechado cada año y su correspondiente área regenerada. Así, se logra un flujo de madera relativamente constante a lo largo del tiempo pero al costo de no necesariamente lograr que el bosque se encuentre completamente regulado al final de la primera rotación (Davis y Johnson, 1987).

En los métodos de regulación por volumen, el manejo del bosque actual constituye la prioridad básica, a diferencia de la regulación por área que se preocupa prioritariamente por el futuro. La regulación por área enfatiza el control del bosque en pie, del cual depende el rendimiento futuro, mientras que en regulación por volumen las prioridades favorecen el control del volumen de extracción (Mendoza, 1993).

La base para definir la estrategia de regulación por volumen se basa en las distintas concepciones del bosque normal. Los métodos difieren entre sí, en el nivel de refinamiento de la descripción del bosque normal y en los mecanismos de control del rendimiento a nivel del bosque (Mendoza, 1993).

A diferencia del método de regulación por área, donde el cálculo de superficie es trivial, existen muchas formas de determinar el volumen de cosecha al aplicar el método de regulación por volumen. Todas las fórmulas de regulación por volumen son puramente heurísticas. Esto significa que ellas son basadas en la intuición más que en un enfoque analítico. Se han desarrollado una extensa variedad de fórmulas, algunas de las cuales fueron utilizadas para condiciones particulares, mientras que otras fueron utilizadas en forma relativamente extensiva.

Se analizan cinco fórmulas: Hundeshagen, von Mantel, Austriaca, Austriaca modificada y Hanzlik. Estas fórmulas se basan en el cálculo de parámetros sencillos tales como inventario del bosque actual y futuro, crecimiento del bosque actual y futuro y rotación.

#### *Fórmula de Hundeshagen*

La fórmula de Hundeshagen se basa en cosechar un mayor volumen cuando las existencias del bosque actual son mayores a la del bosque regulado y viceversa. La fórmula se orienta a avanzar progresivamente desde el nivel de inventario actual al nivel de inventario del bosque regulado. Se espera que una vez alcanzado el nivel de inventario ideal, se genere como consecuencia de ello, un bosque regulado.

Esta fórmula requiere una estimación del inventario actual y del bosque regulado, y una estimación del crecimiento en el bosque regulado. La fórmula no requiere una estimación del crecimiento del bosque actual.

$$C_A = C_R \times \frac{S_A}{S_R}$$

donde;

$C_A$	:	Volumen de cosecha actual (m <sup>3</sup> /año)
$C_R$	:	Crecimiento / Cosecha en el bosque regulado (m <sup>3</sup> /año)
$S_A$	:	Inventario o Existencias del bosque actual (m <sup>3</sup> )
$S_R$	:	Inventario o Existencias del bosque regulado (m <sup>3</sup> )

La fórmula de Hundeshagen se interpreta diciendo que la desviación de la corta actual con respecto a la corta en el bosque regulado es proporcional a la razón de inventarios. Así, si el inventario actual duplica el inventario del bosque normal, la corta actual también debiera duplicar la corta del bosque normal. Por el contrario, si el inventario actual es la mitad del inventario del bosque normal, entonces la corta también debiera reducirse a la mitad.

**Ejemplo 7.1.3.** En el cuadro 7.1.7 se presenta la distribución de clases de edad para un patrimonio de 11.000 ha (el mismo utilizado en Ejemplo 7.2) y su bosque normal equivalente para una rotación de 120 años. Calcular la posibilidad en volumen actual basada en la fórmula de Hundeshagen.

**Resolución 7.1.3.** Para calcular la posibilidad en volumen basado en la fórmula de Hundeshagen, se requiere estimar las existencias actuales, y las existencias y crecimiento del bosque normal.

Cuadro 7.1.7. Distribución de clases de edad para el bosque actual y normal, y tabla de rendimiento asociada para el ejemplo bajo estudio.

Clases de Edad	1 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 120	121 - 140
Area (ha) bosque actual	1000	2000	3000	500	1000	3500	0
Area (ha) bosque normal	1833	1833	1833	1833	1833	1833	0
Rendimientos (m <sup>3</sup> /ha)	0	5	58	174	302	403	470

Función de rendimiento :  $Y=565 (1 - e^{-0.03 X})^9$ ; Y = rendimiento (m<sup>3</sup>/ha); X = edad (años)

El inventario actual se calcula como la suma ponderada de las áreas en cada clase de edad del bosque actual por el rendimiento por hectárea. Esto es:

$$S_A = 1000 \times 0 + 2000 \times 5 + 3000 \times 58 + 500 \times 174 + 1000 \times 302 + 3500 \times 403 = 1.983.500 \text{ m}^3$$

De la misma forma, el inventario del bosque normal se calcula como:

$$S_R = 1833 \times 0 + 1833 \times 5 + 1833 \times 58 + 1833 \times 174 + 1833 \times 302 + 1833 \times 403 = 1.726.686 \text{ m}^3$$

En el bosque normal se cosecha exactamente el crecimiento. El crecimiento del bosque normal se calcula multiplicando el crecimiento medio anual a la edad de rotación ( $3.7 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) por la superficie total (11.000 ha). El crecimiento medio anual se calcula dividiendo el rendimiento a la edad de cosecha ( $440 \text{ m}^3/\text{ha}$ ) por la longitud de la rotación (120 años).

$$C_R = 11.000 \text{ ha} \times 440 \text{ m}^3/\text{ha} / 120 \text{ años} = 40.333 \text{ m}^3/\text{año}$$

Una vez conocidos los valores de inventario actual, y de crecimiento e inventario en el bosque normal, la posibilidad de corta actual de acuerdo a la fórmula de Hundeshagen viene dada por:

$$C_A = 40.333 \text{ m}^3/\text{año} \times 1.983.500 \text{ m}^3 / 1.726.686 \text{ m}^3 = 46.332 \text{ m}^3/\text{año}$$

La aplicación de la posibilidad de corta se encuentra referida a un periodo de ordenación. Por ejemplo, al asumir periodos de veinte años, se debiera cosechar  $46.332 \text{ m}^3/\text{año}$  durante el primer periodo de ordenación 2002-2021. Para el segundo periodo de ordenación (2022-2041), se debiera recalcular la posibilidad de corta basada en el nuevo nivel de inventario.

#### - Fin Ejemplo -

Para proyectar distribuciones de clases de edad basados en el método de regulación por volumen, se debe identificar las áreas que serán cosechadas para cubrir la posibilidad de corta. Considerando la política de cosechar los rodales de mayor edad primero, se debe realizar los siguientes pasos para actualizar la distribución de superficies en el tiempo:

- i) Si la última clase de edad permite cubrir la posibilidad de corta, se debe dividir el volumen de cosecha por el rendimiento por hectárea para esa clase de edad, determinando que superficie será cosechada y regenerada. La diferencia entre la superficie cosechada y el total de la clase se moverá a la siguiente clase de edad en el siguiente periodo.
- ii) Si la última clase de edad no permite cubrir el volumen de cosecha, se debe restar el volumen total aportado por la clase y moverse a la siguiente clase de edad para cubrir la diferencia. Se debe continuar con este proceso hasta alcanzar la posibilidad de corta.
- iii) La superficie cosechada será inmediatamente regenerada por lo que pasa a formar la primera clase de edad, mientras que las áreas no cosechadas se mueven a la siguiente clase de edad en el siguiente periodo.
- iv) Una vez que se ha realizado la proyección de la distribución de clases de edad, se calcula nuevamente la posibilidad de corta, repitiendo la misma secuencia de pasos 1 al 4.

Una vez definidas las áreas que serán cosechadas, el procedimiento para proyectar clases de edad en regulación por área y volumen resultan equivalentes. A continuación se presenta un ejemplo de proyección de distribuciones de clases de edad utilizando la fórmula de Hundeshagen.

**Ejemplo 7.1.4** Basado en la distribución de clases de edad del ejemplo 7.1.3, proyectar las distribuciones de clases de edad basados en la fórmula de Hundeshagen.

**Resolución 7.1.4** Para proyectar la distribución de clases de edad, se debe calcular la posibilidad de corta en cada periodo de acuerdo a los nuevos niveles de inventario. Posterior a ello se cubre dicha posibilidad comenzando por la última clase de edad y avanzando hacia las menores.

Cuadro 7.1.8 Proyección de distribuciones de clases de edad utilizando el método de regulación por volumen (Fórmula de Hundeshagen).

Tiempo (años)	Superficie remanente por clases de edad (ha)							$S_A(m^3)$	$C_A(m^3/año)$	$C_A$ (x 20 años)
	1 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 120	121 - 140			
0	1.000	2.000	3.000	500	1.000	3.500	0	1.983.500	46.332	926.640
20	2.106	1.000	2.000	3.000	500	1.000	1.394	2.175.560	50.818	1.016.360
40	2.142	2.106	1.000	2.000	3.000	500	252	1.961.070	45.808	916.160
60	2.354	2.142	2.106	1.000	2.000	1.398	0	1.761.038	41.135	822.700
(a) 80	1.979	2.354	2.142	2.106	1.000	1.419	0	1.679.744	39.236	784.720
100	1.868	1.979	2.354	2.142	2.106	551	0	1.709.677	39.936	798.720
120	2.109	1.868	1.979	2.354	2.142	548	0	1.731.114	40.436	808.720
140	2.138	2.109	1.868	1.979	2.354	552	0	1.714.623	40.051	801.020
160	2.115	2.138	2.109	1.868	1.979	791	0	1.686.709	39.399	787.980
180	2.023	2.115	2.138	2.109	1.868	747	0	1.686.001	39.383	787.660
200	2.033	2.023	2.115	2.138	2.109	582	0	1.700.984	39.733	794.660
Rend.(m <sup>3</sup> /ha)	0	5	58	174	302	403	470			

$$S_R = 1.726.686 \text{ m}^3 ; C_R = 40.333 \text{ m}^3/año$$

Tiempo (años)	Superficie cosechadas por clases de edad (ha)						
	1 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 120	121 - 140
1 - 20						2.106	
21 - 40						748	1.394
41 - 60					1.602	500	252
(b) 61 - 80					581	1.398	
81 - 100					449	1.419	
101 - 120					1.558	551	
121 - 140					1.590	548	
141 - 160					1.563	552	
161 - 180					1.232	791	
181 - 200					1.286	747	
Rend.(m <sup>3</sup> /ha)	0	22	111	240	357	440	493

En la última línea de ambos cuadros se encuentra los rendimientos por hectárea requeridos para el cálculo de los niveles de inventario y de cosecha respectivamente. Los inventarios se calculan en un punto en el tiempo por lo cual se deben utilizar los rendimientos medios de la clase (e.g. el rendimiento para la clase de edad 21-40 años fue calculado para el valor medio 30 años). Los rendimientos utilizados para el cálculo de volúmenes de cosecha corresponden al valor superior de la clase (e.g. el rendimiento para la clase de edad 21-40 años fue calculado para el valor superior 40 años). Esto se debe a que la cosecha se distribuye a la largo de un periodo, por lo cual los rodales al momento de la cosecha tienen en promedio tienen 10 años más.

El cuadro 7.1.8 a muestra la evolución de clases de edad a lo largo del periodo de planificación utilizando la fórmula de Hundeshagen. Se observa que en el largo plazo el bosque tiende a regularse

a pesar de no alcanzar exactamente esta condición. Sin embargo el volumen de cosecha es más estable en el tiempo que en el caso de regulación por área.

**-Fin Ejemplo-**

*Fórmula de von Mantel*

La fórmula de von Mantel corresponde a una simplificación de la fórmula de Hundeshagen. Se basa en que las existencias de un bosque normal pueden ser aproximadas por un triángulo rectángulo de base igual a la edad de rotación ( R ) y altura igual al crecimiento del bosque normal (C<sub>R</sub>). El crecimiento del bosque normal corresponde al inventario a la edad de rotación como lo muestra la figura. 7.1.8. Además en el bosque normal se cosecha exactamente el crecimiento.

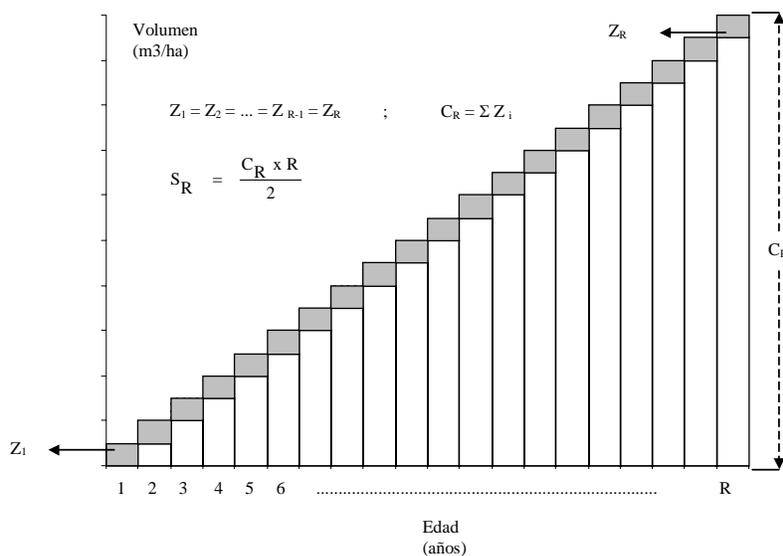


Figura 7.1.8 Simplificación del bosque normal de acuerdo a von Mantel

De esta forma, von Mantel calculó el inventario del bosque normal (S<sub>R</sub>) como:

$$S_R = \frac{C_R \times R}{2}$$

Remplazando el valor de S<sub>R</sub> en la fórmula de Hundeshagen;

$$C_A = C_R \times \frac{S_A}{\frac{C_R \times R}{2}}$$

y simplificando términos semejantes; queda,

$$C_A = \frac{2S_A}{R}$$

donde;	$C_A$	:	Volumen de cosecha actual ( $m^3/año$ )
	$S_A$	:	Inventario o Existencias del bosque actual ( $m^3$ )
	$R$	:	Longitud de rotación en bosque normal (años)

La ventaja de la fórmula de von Mantel es que sólo requiere una estimación del inventario del bosque actual y la rotación en el bosque normal. No requiere una estimación ni del inventario ni del crecimiento en el bosque normal. El método de proyección de distribuciones de clases de edad es equivalente al utilizado con la fórmula de Hundeshagen.

#### *Fórmula Austriaca*

La fórmula Austriaca asume que el volumen de cosecha debiera ser igual al crecimiento, corregido por la diferencia de inventarios (actual y normal). Como sucede con la fórmula de Hundeshagen, el ajuste será positivo si el bosque se encuentra en superávit y negativo si el bosque se encuentra en déficit con relación al bosque normal. Esta fórmula combina el crecimiento con un periodo de ajuste para moverse del inventario actual al del bosque normal. La fórmula es la siguiente:

$$C_A = G_A + \frac{S_A - S_R}{a}$$

donde;	$C_A$	:	Volumen de cosecha actual ( $m^3/año$ )
	$G_A$	:	Crecimiento Periódico actual ( $m^3/año$ )
	$S_A$	:	Inventario o Existencias del bosque actual ( $m^3$ )
	$S_R$	:	Inventario o Existencias del bosque normal ( $m^3$ )
	$a$	:	Periodo de ajuste (años)

El valor de “a” corresponde al periodo de ajuste requerido para reducir o aumentar el inventario actual hasta alcanzar el inventario del bosque normal. Alternativamente, “1/a” puede interpretarse como la proporción de exceso de inventario que será removido cada año.

#### *Fórmula Austriaca Modificada*

Se diferencia de la fórmula Austriaca en que considera el promedio de crecimiento entre el bosque actual y el normal. La fórmula es:

$$C_A = \frac{G_A + G_R}{2} + \frac{S_A - S_R}{a}$$

donde;

$C_A$	:	Volumen de cosecha actual (m <sup>3</sup> /año)
$G_A$	:	Crecimiento actual (m <sup>3</sup> /año)
$G_R$	:	Crecimiento del bosque normal (m <sup>3</sup> /año)
$S_A$	:	Inventario del bosque actual (m <sup>3</sup> )
$S_R$	:	Inventario del bosque normal (m <sup>3</sup> )
$a$	:	Periodo de ajuste (años)

### *Fórmula de Hanzlik*

Esta fórmula fue desarrollada para iniciar la ordenación de bosques primarios sobremaduros en Estados Unidos. La fórmula establece que la posibilidad de corta depende del crecimiento del bosque actual y del exceso de inventario de aquellos rodales de edad superior a la rotación de la especie.

$$C_A = G_A + \frac{I_m}{R}$$

donde;

$C_A$	:	Volumen de cosecha actual (m <sup>3</sup> /año)
$G_A$	:	Crecimiento actual (m <sup>3</sup> /año)
$I_m$	:	Inventario de las clases de edad sobre maduras (m <sup>3</sup> )
$R$	:	Rotación deseada (años)

Para calcular el crecimiento del bosque actual ( $G_A$ ) se debe primero estimar el crecimiento periódico por hectárea para cada clase de edad utilizando la tabla de rendimientos. Luego el crecimiento del bosque se calcula como la suma ponderada de los crecimientos periódicos por hectárea por las superficies en cada clases de edad (McDill, 1993).

$$G_A = \sum_{i=1}^N g_i A_i \qquad g_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{n}$$

donde;

$G_A$	:	Crecimiento del bosque actual (m <sup>3</sup> /año)
$g_i$	:	Crecimiento periódico de la clase de edad $i$ (m <sup>3</sup> /ha/año)
$A_i$	:	Area en la clase de edad $i$ (ha)
$N$	:	Número de clases de edad

donde;

$v_i$	:	Volumen de la clase de edad $i$ (m <sup>3</sup> /ha)
$v_{i-1}$	:	Volumen de la clase de edad $i-1$ (m <sup>3</sup> /ha)
$n$	:	Amplitud de la clase de edad (años)

Las fórmulas presentadas (Hundeshagen, von Mantel, Austriaca, Austriaca modificada y Hanzlik) tienen la ventaja que permiten estimar la posibilidad de corta con muy poca información y pueden ser usadas como un primer paso hacia la ordenación del bosque. Sin embargo, estas fórmulas no permiten conocer cómo, cuándo y donde intervenir para completar la posibilidad de corta. Además, debido a que las fórmulas requieren de poca información y muy agregada, es que suelen ser bastante imprecisas (Leuschner, 1992).

### 7.1.3. Modelos de ordenación forestal

Aún cuando las técnicas tradicionales de regulación forestal poseen un inmenso valor histórico y educacional, ellas usualmente no pueden ser exitosamente aplicadas en forma estricta en situaciones del mundo real debido a que usualmente el objetivo de quien toma decisiones no se centra en lograr un equilibrio de clases de edad. Además los métodos tradicionales se basan en parámetros físicos para llevar a cabo la ordenación, con escasa participación de la componente económica (Davis y Johnson, 1987).

Actualmente, la presión que ejerce la sociedad sobre los bosques, hace que la ordenación forestal considere objetivos más amplios y mayor cantidad de restricciones de orden económico, social y ambiental que en el pasado. Además, se dispone de tecnología de procesamiento eficiente y un mayor conocimiento de los recursos para apoyar la toma de decisiones. Por estas razones, enfoques alternativos han sido desarrollados.

Los modelos de ordenación, a diferencia de los métodos clásicos, son más flexibles porque reconocen los objetivos de quien toma las decisiones y las restricciones que operan en el sistema forestal. De esta forma, se acota un universo de posibles soluciones, buscando generalmente en forma dirigida, el mejor curso de acción a seguir.

#### 7.1.3.1 Problema de ordenación

La programación de intervenciones en el tiempo, no es una tarea trivial, porque involucra distintos objetivos de uso y el análisis de numerosos factores atribuibles al medio forestal como a su entorno. Como resultado de ello, existe una amplia gama de posibles soluciones, donde resulta difícil decidir cual es la mejor de ellas, dada una capacidad humana limitada de procesamiento de información. Adicionalmente, los sistemas forestales consideran un alto grado de incertidumbre asociado a los ciclos de producción, lo que hace aún más difícil el proceso de toma de decisiones (Davis y Johnson, 1987).

El problema de ordenación consiste en asignar recursos forestales escasos en forma óptima para satisfacer las necesidades actuales y futuras de la sociedad en su conjunto. Operativamente, consiste en decidir cómo, cuándo y dónde intervenir para satisfacer a niveles aceptables los objetivos de quien toma decisiones. La elección de una estrategia de ordenación usualmente implica compromisos económicos, que suelen ser irreversibles, sobre las inversiones, las ganancias y las actividades industriales (Villanueva, 1992).

#### 7.1.3.2 Simplificación del problema de ordenación

La ordenación considera procesos de planificación, gestión y control. La planificación considera la colección de información de un predio o patrimonio, una definición de objetivos y prioridades entre ellos, una evaluación de alternativas y una toma de decisiones. La gestión consiste en la ejecución de lo planificado. El control implica la revisión y comparación entre lo planificado y lo ejecutado (Madrigal, 1995).

El problema de ordenación puede ser simplificado al considerar un enfoque jerárquico de decisión. Este enfoque posee tres elementos que es importante destacar en ordenación: (a) construir modelos separados para cada nivel jerárquico, (b) implementar soluciones sobre un horizonte de planificación que se actualiza constantemente y (c) reconocer explícitamente la incertidumbre.

El primer elemento de simplificación consiste en usar modelos diferentes para cada nivel de decisión. Así, en vez de construir un único modelo muy complejo capaz de programar intervenciones en forma detallada, se puede construir modelos diferentes y más simples para el largo, mediano y corto plazo. Normalmente los modelos de nivel superior serán utilizados con información agregada, generando los lineamientos que podrán ser utilizados en los niveles de decisión inferior, donde se utilizará información más detallada.

El segundo elemento para simplificar la ordenación, es implementar las soluciones sobre un horizonte de planificación móvil. Así, por ejemplo, un modelo estratégico de ordenación puede desarrollar un plan para los próximos 120 años pero sólo las decisiones inmediatas del plan (por ejemplo los próximos 20 años) son explícitamente consideradas. Antes de implementar futuras fases, se debe desarrollar una actualización de dicho plan. De la misma forma, un modelo táctico puede desarrollar un plan para los próximos 20 años, pero sólo las decisiones para los próximos 5 años son explícitamente consideradas. Antes de la implementación del segundo quinquenio, el modelo táctico será corrido nuevamente con la información actualizada. El resultado global de esta filosofía es que la planificación no se realiza una vez y para todo un horizonte de planificación, sino que es un proceso de actividad dinámica permanente.

El tercer elemento para simplificar la ordenación, es el reconocimiento que el ambiente de planificación es incierto y que la mayor parte de dicha incertidumbre corresponde a periodos lejanos en el futuro. Así, se debe reconocer que los modelos estratégicos usarán información agregada que permitirá guiar en forma aproximada las políticas que intentan optimizar la producción de los bosques en el tiempo, dejando decisiones detalladas para que sean hechas cuando información más precisa se encuentre disponible (Gunn, 1991).

Lo anterior coincide con lo planteado por Dubourdieu (1993), quien señala que la programación de intervenciones se vuelve completamente ilusoria más allá de dos o tres decenios. El mismo autor señala que los planes de ordenación contemplan algunas disposiciones imperativas y otras indicativas, las que pueden ser reajustadas y especificadas en programas quinquenales y anuales.

#### 7.1.3.3 Modelos de ordenación de nivel estratégico

Un modelo de ordenación es una herramienta que permite programar la secuencia de intervenciones silviculturales de un conjunto de rodales que conforman el patrimonio de una organización, de una región o de un país. Permiten analizar cómo, cuándo y dónde intervenir para satisfacer los objetivos de la ordenación, basado en las restricciones del medio y de su entorno. Los modelos de ordenación representan la realidad en forma simplificada por lo que permiten apoyar la toma de decisiones pero no constituyen decisión. La importancia de los modelos de ordenación radica que las políticas óptimas a nivel del rodal son raramente óptimas a nivel patrimonial (García, 1984).

Para programar la secuencia de intervenciones a nivel patrimonial se ha utilizado tradicionalmente simulación y optimización. Los modelos de optimización generalmente requieren de una considerable simplificación de los objetivos de la ordenación y del número de variables consideradas. En contraste, los modelos de simulación pueden operar a un nivel más detallado, pero evaluando sólo una reducida proporción del universo de posibilidades, con el consecuente peligro de no considerar la más apropiada.

No obstante lo anterior, simulación y optimización se consideran herramientas complementarias más que competitivas. Esto se debe a que un modelo de optimización permite reducir el universo de posibilidades, lo que posteriormente puede ser explorado a un nivel más detallado usando simuladores. En la práctica, sin embargo, no es tan fácil alternar entre modelos debido a las diferentes concepciones del bosque y requerimientos de información.

## MODELOS BASADOS EN SIMULACIÓN

Los modelos basados en simulación permiten proyectar distribuciones de clases de edad, considerando el estado actual del patrimonio y la política de intervención definida por el usuario. A base de las distribuciones de clases de edad se proyecta los volúmenes cosechados y se calcula los criterios de desempeño de la política adoptada (e.g. valor presente neto). A modo de ejemplo, Buongiorno y Gilles (1987) proponen un algoritmo escrito en lenguaje BASIC, para evaluar distintas estrategias de ordenación.

La programación de estos algoritmos, ha dado origen a aplicaciones utilizadas rutinariamente en ordenación. Por ejemplo, dos de los modelos de ordenación basados en simulación más conocidos y utilizados en Nueva Zelanda son: RMS (Resource Maturity Simulator - Allison, 1986) e IFS (Interactive Forest Simulator - García, 1981).

## MODELOS BASADOS EN OPTIMIZACIÓN

Los modelos basados en optimización permiten buscar aquellas soluciones que sustentan los mayores niveles de logro, entre todas aquellas que satisfacen las restricciones del medio y de su entorno. La búsqueda de la mejor solución se realiza mediante algoritmos eficientes sean exactos o heurísticos, lineales o no lineales, dependiendo de la naturaleza del problema.

A partir de la década de los sesenta, se generaron una gran cantidad de modelos de ordenación basados fundamentalmente en programación matemática lineal (Curtis, 1962; Loucks, 1964; Nautiyal y Pearse, 1967). Sin embargo, no fue hasta la década de los setenta que los modelos llegaron a estar disponibles y a ser utilizados en forma rutinaria en ordenación.

Johnson y Scheurman (1977) revisaron y analizaron los modelos existentes a esa fecha y los clasificaron en dos categorías (I y II). En la categoría I, la identidad de las unidades de análisis se mantiene íntegra a lo largo del horizonte de planificación. Sin embargo, estas pueden ser fraccionadas mediante la aplicación de distintos regímenes silviculturales en cada una de ellas. Aún así es posible rastrear la identidad de las unidades originales. A continuación se presenta un ejemplo de modelo I.

**Ejemplo 7.1.5** Considere un patrimonio formado por tres rodales de similar productividad y que serán intervenidos de manera tal que se maximice la rentabilidad del cultivo sujeto a restricciones de rendimiento no decreciente. Considere un horizonte de planificación de 30 años y periodos de 10 años. Formule, resuelva y analice el problema de ordenación considerando la superficie de los rodales, la tabla de rendimientos y parámetros financieros. Utilice una formulación de tipo I.

Superficie		Edad	Edad		Rendimiento
(ha)		(años)	(años)	(m <sup>3</sup> /ha)	
A	300	5	0	0	
B	500	15	10	152	
C	150	25	20	449	
			30	781	
			40	965	
			50	1074	
			60	1115	

Tasa de descuento	:	8% p.a.
Ingreso neto por m <sup>3</sup>	:	5 M\$/m <sup>3</sup>
Obvie costos de formación.		

**Resolución 7.1.5.** El problema de ordenación se formula al explicitar variables de decisión, parámetros, función objetivo y restricciones.

Sea  $X_{it}$  la variable de decisión que representa la superficie del rodal “i” que será cosechado en el periodo “t”. El sub-índice “i” variará desde 1 a 3 dependiendo de si se trata del rodal A, B o C respectivamente. El subíndice “t” variará entre 1 y 3 dado que se trata de tres periodos sucesivos de 10 años. Por ejemplo  $X_{32}$  representa la superficie del rodal C que será cosechada en el segundo periodo. Existirán entonces nueve variables de decisión cuyo valor interesa conocer.

Sea  $V_{it}$  el parámetro que representa el rendimiento que se obtendría al cosechar una hectárea del rodal “i” en el periodo “t”. Además se tiene el parámetro  $I_{it}$  que representa los ingresos netos descontados producto de cosechar una hectárea del rodal i en el periodo t. La tabla a continuación explicita el valor de los parámetros.

Periodo	RODAL A (i=1)			RODAL B (i=2)			RODAL C (i=3)		
	Edad	$V_{1t}$	$I_{1t}$	Edad	$V_{2t}$	$I_{2t}$	Edad	$V_{3t}$	$I_{3t}$
1 [0-10]	10	152	517	20	449	1528	30	781	2658
2 [11-20]	20	449	707	30	781	1231	40	965	1521
3 [21-30]	30	781	570	40	965	705	50	1074	784

La función objetivo puede ser representada mediante la sumatoria de las superficies cosechadas ( $X_{it}$ ) por los ingresos netos descontados ( $I_{it}$ ). En forma implícita esto se expresa como:

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 I_{it} X_{it}$$

Mientras que la forma explícita de la función objetivo se expresa como:

$$\text{Max } z = 517 X_{11} + 707 X_{12} + 570 X_{13} + 1528 X_{21} + 1231 X_{22} + 705 X_{23} + 2658 X_{31} + 1521 X_{32} + 784 X_{33}$$

Las restricciones al modelo de ordenación pueden ser divididas en estructurales o duras y atribuibles a la ordenación o blandas. Las restricciones estructurales se refieren a los recursos limitados que se tiene disponibles. En este caso, implican que no se puede cosechar una superficie mayor a la existente en cada rodal. En forma implícita esto se expresa como:

$$\sum_{t=1}^3 X_{it} \leq a_i \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad ; \text{ donde } a_i \text{ representa la superficie de cada rodal}$$

Mientras que en forma explícita esto se expresa como:

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} \leq 300 \text{ ha}$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} \leq 500 \text{ ha}$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} \leq 150 \text{ ha}$$

Las restricciones atribuibles a la ordenación o blandas corresponden a aquellas restricciones impuestas por el entorno económico, social y ambiental del recurso. En este caso, se establece que los rendimientos totales por periodo ( $R_t$ ) no deben decrecer en el tiempo. Esto se puede realizar tomando parejas de periodos sucesivos; y estableciendo que el rendimiento en un periodo no debe ser inferior al anterior:

$$R_2 \geq R_1 \quad \Rightarrow \quad R_2 - R_1 \geq 0$$

$$R_3 \geq R_2 \quad \Rightarrow \quad R_3 - R_2 \geq 0$$

Pero;

$$R_1 = 152 X_{11} + 449 X_{21} + 781 X_{31} \quad (\text{Volumen total cosechado en el periodo 1})$$

$$R_2 = 449 X_{12} + 781 X_{22} + 965 X_{32} \quad (\text{Volumen total cosechado en el periodo 2})$$

$$R_3 = 781 X_{13} + 965 X_{23} + 1074 X_{33} \quad (\text{Volumen total cosechado en el periodo 3})$$

Entonces;

$$R_2 - R_1 = 449 X_{12} + 781 X_{22} + 965 X_{32} - 152 X_{11} - 449 X_{21} - 781 X_{31} \geq 0$$

$$R_3 - R_2 = 781 X_{13} + 965 X_{23} + 1074 X_{33} - 449 X_{12} - 781 X_{22} - 965 X_{32} \geq 0$$

Y en forma implícita;

$$\sum_{i=1}^3 X_{i,t+1} V_{i,t+1} - \sum_{i=1}^3 X_{i,t} V_{i,t} \geq 0 \quad \forall t = 1, 2$$

De esta forma, la formulación del problema de ordenación es la siguiente:

$$\text{Max } z = 517 X_{11} + 707 X_{12} + 570 X_{13} + 1528 X_{21} + 1231 X_{22} + 705 X_{23} + 2658 X_{31} + 1521 X_{32} + 784 X_{33}$$

s.a.

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} \leq 300 \text{ ha}$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} \leq 500 \text{ ha}$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} \leq 150 \text{ ha}$$

$$449 X_{12} + 781 X_{22} + 965 X_{32} - 152 X_{11} - 449 X_{21} - 781 X_{31} \geq 0$$

$$781 X_{13} + 965 X_{23} + 1074 X_{33} - 449 X_{12} - 781 X_{22} - 965 X_{32} \geq 0$$

La representación anterior corresponde a una estructura de programación matemática lineal, por lo que puede ser resuelto mediante la aplicación del algoritmo Simplex. En la figura 7.1.9, se presenta la resolución entregada por LINDO (Linear Interactive Discrete Optimizer).

LP OPTIMUM FOUND AT STEP			6
OBJECTIVE FUNCTION VALUE			
1)	1255714.		
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST	
X11	0.000000	317.616638	
X12	18.378748	0.000000	
X13	281.621246	0.000000	
X21	228.944763	0.000000	
X22	271.055237	0.000000	
X23	0.000000	389.898804	
X31	150.000000	0.000000	
X32	0.000000	678.097900	
X33	0.000000	1277.670532	
ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES	
A)	0.000000	772.846924	
B)	0.000000	1345.535522	
C)	0.000000	2340.617432	
2&1)	0.000000	-0.406380	
3&2)	0.000000	-0.259727	

Figura 7.1.9 Solución óptima al problema de ordenación propuesto (tipo I) utilizando LINDO (Schrage, 1981)

Se encontró una solución óptima después de 6 iteraciones con un valor presente neto (VPN) de M\$1.255.714. La solución óptima consiste en cosechar 229 ha del rodal B y 150 ha del rodal C en el primer periodo, 18 ha del rodal A y 271 ha del rodal B en el segundo periodo y 282 ha del rodal C en el tercer periodo.

Las holguras (slack) corresponden a la diferencia entre el lado derecho y el lado izquierdo de una restricción y representan recursos no utilizados en la solución óptima. Para las tres primeras restricciones, las holguras iguales a cero implican que la superficie de cada rodal se cosecha completamente durante el horizonte de planificación. Para las restricciones de rendimiento no decreciente, los excesos (surplus) iguales a cero implican que los volúmenes totales cosechados por periodo son iguales entre sí, de manera que las diferencias se hacen iguales a cero. En efecto, en cada periodo se cosecha volúmenes equivalentes ( $219.944 \text{ m}^3$ )

Los costos reducidos corresponden a la cantidad en que debe aumentar (o disminuir) el coeficiente de una variable de decisión en la función objetivo, para que ésta pueda entrar a la base. Por ejemplo, el costo reducido de  $X_{11}$  es M\$318, lo que implica que el coeficiente de esta variable en la función objetivo (M\$517) debiera aumentar en M\$318 ( $517 + 318 = \text{M}\$835$ ) para que  $X_{11}$  deje de ser cero.

Los precios sombra (shadow prices o dual prices) corresponden al valor en que aumenta (disminuye) el valor de la función objetivo al aumentar en una unidad el lado derecho de una restricción. Por ejemplo el precio sombra de la primera restricción (Rodal A) es de M\$772, lo que significa que si la superficie del rodal A fuese de 301 ha en vez de 300 ha, el valor de la función

objetivo aumentaría en M\$772 (desde M\$1.255.714 a M\$1.256.486). También se interpreta en este caso como el máximo valor a pagar por una hectárea adicional. Así, los máximos valores a pagar por cada hectárea extra de los rodales A, B y C serían de M\$772, M\$1.345 y M\$2.340, respectivamente.

**-Fin Ejemplo-**

En un modelo tipo II, la identidad se pierde cuando dos unidades de análisis (o rodales) de distintas edades son cosechadas y regenerados como una misma estructura, por lo que se hace difícil rastrear que parte de la superficie cosechada pertenece a una u otra unidad de análisis (o rodal). A continuación se presenta un ejemplo de modelo II.

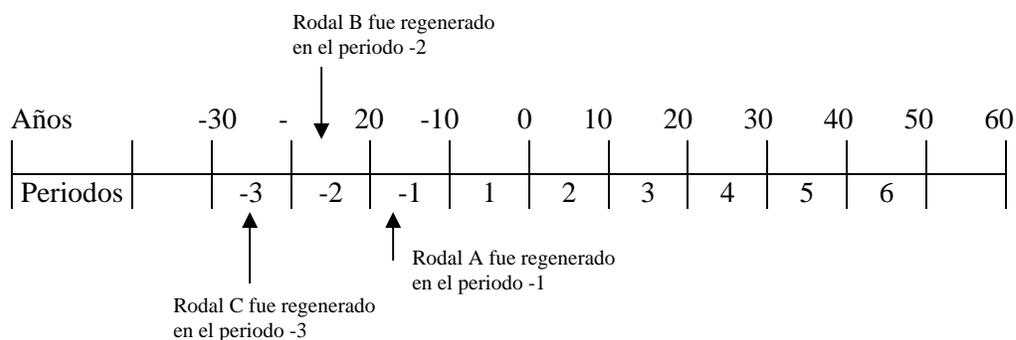
**Ejemplo 7.1.6.** Considere un patrimonio formado por tres rodales de similar productividad y que serán intervenidos de manera tal que se maximice la rentabilidad del cultivo sujeto a restricciones de rendimiento no decreciente. Considere la posibilidad de cosechar más de una vez una misma hectárea sobre un horizonte de planificación de 60 años con periodos de 10 años. Formule, resuelva y analice el problema de ordenación considerando la superficie de los rodales, la tabla de rendimientos y parámetros financieros. Utilice una formulación de tipo II.

Superficie (ha)	Edad (años)		Edad (años)	Rendimiento (m <sup>3</sup> /ha)
A	300	5	0	0
B	500	15	10	152
C	150	25	20	449
			30	781
			40	965
Tasa de descuento	:	8% p.a.	50	1074
Ingreso neto por m <sup>3</sup>	:	5 M\$/m <sup>3</sup>	60	1115
Obvie costos de formación.				

**Resolución 7.1.6.** El problema de ordenación se formula al explicitar variables de decisión, parámetros, función objetivo y restricciones.

a) *Variable de decisión*

Para entender la variable de decisión resulta útil representar el tiempo mediante una línea donde el valor cero representa el tiempo actual, los valores negativos el pasado y los valores positivos el futuro.



Sea;

$Y_{ij}$  = superficie regenerada en el periodo “i” y cosechada en el periodo “j”, posterior a lo cual será inmediatamente regenerada.

Se debe considerar que los rodales A, B y C fueron regenerados 5, 15 y 25 años antes del inicio del horizonte de planificación, vale decir en los periodos -1, -2 y -3 respectivamente. De esta forma, las variables de decisión pueden ser divididas entre aquellas donde el bosque fue regenerado antes del año 0 (Grupo 1) y después del año 0 (Grupo 2).

Grupo 1

$Y_{-11}$	$Y_{-12}$	$Y_{-13}$	$Y_{-14}$	$Y_{-15}$	$Y_{-16}$
$Y_{-21}$	$Y_{-22}$	$Y_{-23}$	$Y_{-24}$	$Y_{-25}$	$Y_{-26}$
$Y_{-31}$	$Y_{-32}$	$Y_{-33}$	$Y_{-34}$	$Y_{-35}$	$Y_{-36}$

Grupo 2

Por ejemplo  $Y_{-23}$  significa la superficie que fue regenerada en el periodo -2 (rodal B) y que será cosechada en el periodo 3. De la misma forma  $Y_{35}$  representa la superficie regenerada en el periodo 3 y cosechada en el periodo 5.

Además el número de variables puede ser reducido considerablemente al considerar una edad mínima y una edad máxima de cosecha. Para el ejemplo, al establecer una edad mínima de 20 años y una máxima de 40 años, el número de variables se reduce desde 33 a 17 variables (encuadradas).

$Y_{12}$	$Y_{23}$	$Y_{34}$	$Y_{45}$	$Y_{56}$
$Y_{13}$	$Y_{24}$	$Y_{35}$	$Y_{46}$	
$Y_{14}$	$Y_{25}$	$Y_{36}$		
$Y_{15}$	$Y_{26}$			
$Y_{16}$				

b) *Parámetros*

Como parámetros fundamentales se establecen los rendimientos que se obtendrían en el periodo “j” al cosechar una hectárea regenerada en el periodo “i” ( $V_{ij}$ ) y los ingresos netos descontados producto de cosechar dicha superficie ( $I_{ij}$ ).

Grupo	Var	Edad	V1t	I1t	Grupo	Var	Edad	V1t	I1t
	$Y_{-12}$	20	449	707		$Y_{13}$	20	449	328
	$Y_{-13}$	30	781	570		$Y_{14}$	30	781	264
	$Y_{-14}$	40	965	326		$Y_{15}$	40	965	151
	$Y_{-21}$	20	449	1528		$Y_{24}$	20	449	152
1	$Y_{-22}$	30	781	1231	2	$Y_{25}$	30	781	122
	$Y_{-23}$	40	965	705		$Y_{26}$	40	965	70
	$Y_{-31}$	30	781	2658		$Y_{35}$	20	449	70
	$Y_{-32}$	40	965	1521		$Y_{36}$	30	781	57
						$Y_{46}$	20	449	33

c) *Función Objetivo*

La función objetivo puede ser representada mediante la sumatoria de las superficies cosechadas ( $Y_{ij}$ ) por los ingresos netos descontados ( $I_{it}$ ). Esto se expresa como:

$$\text{Max } z = 707 Y_{-12} + 570 Y_{-13} + 326 Y_{-14} + 1528 Y_{-21} + 1231 Y_{-22} + 705 Y_{-23} + 2658 Y_{-31} + 1521 Y_{-32} \\ + 328 Y_{13} + 264 Y_{14} + 151 Y_{15} + 152 Y_{24} + 122 Y_{25} + 70 Y_{26} + 70 Y_{35} + 57 Y_{36} + 33 Y_{46}$$

d) *Restricciones estructurales*

d.1) La superficie en cada clase de edad en el año cero debe ser cosechada a lo largo del horizonte de planificación.

$$\begin{aligned} Y_{-12} + Y_{-13} + Y_{-14} &= 300 \text{ ha} \\ Y_{-21} + Y_{-22} + Y_{-23} &= 500 \text{ ha} \\ Y_{-31} + Y_{-32} &= 150 \text{ ha} \end{aligned}$$

d.2) La superficie cosechada en cada periodo debe ser regenerada inmediatamente y subsecuentemente cosechada

$$\begin{aligned}
Y_{-21} + Y_{-31} &= Y_{13} + Y_{14} + Y_{15} \\
Y_{-12} + Y_{-22} + Y_{-32} &= Y_{24} + Y_{25} + Y_{26} \\
Y_{-13} + Y_{-23} &= Y_{35} + Y_{36} \\
Y_{-14} &= Y_{46}
\end{aligned}$$

e) Restricciones atribuibles a la ordenación

e.1) Restricciones de rendimiento no decreciente.

Se establece que los rendimientos totales por periodo (Rt) no deben decrecer en el tiempo. Esto se puede realizar tomando parejas de periodos sucesivos; y estableciendo que el rendimiento en un periodo no debe ser inferior al anterior:

$$\begin{aligned}
R_2 \geq R_1 &\Rightarrow R_2 - R_1 \geq 0 \\
R_3 \geq R_2 &\Rightarrow R_3 - R_2 \geq 0 \\
R_4 \geq R_3 &\Rightarrow R_4 - R_3 \geq 0 \\
R_5 \geq R_4 &\Rightarrow R_5 - R_4 \geq 0 \\
R_6 \geq R_5 &\Rightarrow R_6 - R_5 \geq 0
\end{aligned}$$

Pero;

$$\begin{aligned}
R_1 &= 449 Y_{-21} + 781 Y_{-31} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 1)} \\
R_2 &= 449 Y_{-12} + 781 Y_{-22} + 965 Y_{-32} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 2)} \\
R_3 &= 449 Y_{13} + 781 Y_{-13} + 965 Y_{-23} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 3)} \\
R_4 &= 449 Y_{24} + 781 Y_{14} + 965 Y_{-14} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 4)} \\
R_5 &= 449 Y_{35} + 781 Y_{25} + 965 Y_{15} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 5)} \\
R_6 &= 449 Y_{46} + 781 Y_{36} + 965 Y_{26} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 6)}
\end{aligned}$$

Entonces;

$$\begin{aligned}
R_2 - R_1 &= 449 Y_{-12} + 781 Y_{-22} + 965 Y_{-32} - 449 Y_{-21} + 781 Y_{-31} \geq 0 \\
R_3 - R_2 &= 449 Y_{13} + 781 Y_{-13} + 965 Y_{-23} - 449 Y_{-12} + 781 Y_{-22} + 965 Y_{-32} \geq 0 \\
R_4 - R_3 &= 449 Y_{24} + 781 Y_{14} + 965 Y_{-14} - 449 Y_{13} + 781 Y_{-13} + 965 Y_{-23} \geq 0 \\
R_5 - R_4 &= 449 Y_{35} + 781 Y_{25} + 965 Y_{15} - 449 Y_{24} + 781 Y_{14} + 965 Y_{-14} \geq 0 \\
R_6 - R_5 &= 449 Y_{46} + 781 Y_{36} + 965 Y_{26} - 449 Y_{35} + 781 Y_{25} + 965 Y_{15} \geq 0
\end{aligned}$$

De esta forma, la formulación del problema de ordenación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
\text{Max } z &= 707 Y_{-12} + 570 Y_{-13} + 326 Y_{-14} + 1528 Y_{-21} + 1231 Y_{-22} + 705 Y_{-23} + 2658 Y_{-31} + 1521 Y_{-32} \\
&\quad + 328 Y_{13} + 264 Y_{14} + 151 Y_{15} + 152 Y_{24} + 122 Y_{25} + 70 Y_{26} + 70 Y_{35} + 57 Y_{36} + 33 Y_{46}
\end{aligned}$$

s.a.

$$Y_{-12} + Y_{-13} + Y_{-14} = 300 \text{ ha}$$

$$\begin{aligned}
Y_{-21} + Y_{-22} + Y_{-23} &= 500 \text{ ha} \\
Y_{-31} + Y_{-32} &= 150 \text{ ha} \\
Y_{-21} + Y_{-31} &= Y_{13} + Y_{14} + Y_{15} \\
Y_{-12} + Y_{-22} + Y_{-32} &= Y_{24} + Y_{25} + Y_{26} \\
Y_{-13} + Y_{-23} &= Y_{35} + Y_{36} \\
Y_{-14} &= Y_{46} \\
449 Y_{-12} + 781 Y_{-22} + 965 Y_{-32} - 449 Y_{-21} - 781 Y_{-31} &\geq 0 \\
449 Y_{13} + 781 Y_{-13} + 965 Y_{-23} - 449 Y_{-12} - 781 Y_{-22} - 965 Y_{-32} &\geq 0 \\
449 Y_{24} + 781 Y_{14} + 965 Y_{-14} - 449 Y_{13} - 781 Y_{-13} - 965 Y_{-23} &\geq 0 \\
449 Y_{35} + 781 Y_{25} + 965 Y_{15} - 449 Y_{24} - 781 Y_{14} - 965 Y_{-14} &\geq 0 \\
449 Y_{46} + 781 Y_{36} + 965 Y_{26} - 449 Y_{35} - 781 Y_{25} - 965 Y_{15} &\geq 0
\end{aligned}$$

La representación anterior corresponde a una estructura de programación matemática lineal, por lo que puede ser resuelto mediante la aplicación del algoritmo simplex. En la figura 7.1.10, se presenta la resolución entregada por LINDO (Linear Interactive Discrete Optimizer).

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 19		
OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	1424924.	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y-12	61.605980	0.000000
Y-13	238.394028	0.000000
Y-14	0.000000	335.015808
Y-21	244.724457	0.000000
Y-22	255.275543	0.000000
Y-23	0.000000	327.459869
Y-31	150.000000	0.000000
Y-32	0.000000	535.832397
Y13	90.970047	0.000000
Y14	290.693054	0.000000
Y15	13.061347	0.000000
Y24	0.000000	100.106781
Y25	274.554535	0.000000
Y26	42.326996	0.000000
Y35	0.000000	81.806633
Y36	238.394028	0.000000
Y46	0.000000	0.000000

Figura 7.1.10 Solución óptima al problema de ordenación propuesto (tipo II) utilizando LINDO (Schrage, 1981)

Se encontró una solución óptima después de 19 iteraciones con un valor presente neto (VPN) de M\$1.424.924. En el rodal A, se cosecharán 62 ha en el segundo periodo y 238 ha en el tercero. En el rodal B, se cosecharán 245 ha en el primer periodo y 255 ha en el segundo. El rodal C será cosechado completamente en el primer periodo (150 ha).

La superficie cosechada en cada periodo será inmediatamente regenerada y subsecuentemente cosechada. La superficie cosechada en el primer periodo ( $Y_{-21} + Y_{-31} = 395$  ha) será inmediatamente regenerada y subsecuentemente cosechada en el periodo 3 ( $Y_{13}=91$  ha), periodo 4 ( $Y_{14}=291$  ha) y en el periodo 5 ( $Y_{15}=13$  ha). La superficie cosechada en el segundo periodo ( $Y_{-12} + Y_{-22} + Y_{-32} = 317$  ha) será inmediatamente regenerada y subsecuentemente cosechada en el periodo 5 ( $Y_{25}=275$  ha) y en el periodo 6 ( $Y_{26}=42$  ha). La superficie cosechada en el tercer periodo ( $Y_{-13} + Y_{-23} = 238$  ha) será inmediatamente regenerada y subsecuentemente cosechada en el periodo 6 ( $Y_{36}=238$  ha).

La política de corta adoptada permite cosechar exactamente 227.031 m<sup>3</sup> en cada periodo de 10 años, o lo que es equivalente 22.703 m<sup>3</sup> por año.

**-Fin Ejemplo-**

García (1984) discutió los modelos de tipo I y II, y propuso una tercera categoría (tipo III), utilizando algunos elementos de los tipos I y II, y creando otros nuevos. Este modelo ha sido implementado como FOLPI (forest optimiser linear programming interpreter) por el New Zealand Forest Research Institute, y es utilizado rutinariamente en ordenación. A continuación se presenta un ejemplo de este tipo de estructura.

**Ejemplo 7.1.7.** Considere un patrimonio formado por tres rodales de similar productividad y que serán intervenidos de manera tal que se maximice la rentabilidad del cultivo sujeto a restricciones de rendimiento no decreciente. Considere la posibilidad de cosechar más de una vez una misma hectárea sobre un horizonte de planificación de 60 años con periodos de 10 años. Formule, resuelva y analice el problema de ordenación considerando la superficie de los rodales, la tabla de rendimientos y parámetros financieros. Utilice una formulación de tipo III.

Superficie (ha)	Edad (años)	Edad (años)	Rendimiento (m <sup>3</sup> /ha)
A	300	5	0
B	500	15	152
C	150	25	449
			781
			965
			1074
			1115

Tasa de descuento	:	8% p.a.
Ingreso neto por m <sup>3</sup>	:	5 M\$/m <sup>3</sup>

Obvie costos de formación.

**Resolución 7.1.7.** El problema de ordenación se formula al explicitar variables de decisión, parámetros, función objetivo y restricciones.

a) *Variable de decisión*

La variable de decisión corresponde a la superficie de la clase de edad “j” que será cosechada en el periodo “t” ( $Y_{tj}$ ). Por ejemplo  $Y_{34}$  representa la superficie cosechada de la clase de edad 4 (30-40 años) en el periodo 3 (20-30 años a lo largo del horizonte de planificación).

Normalmente se puede reducir considerablemente el número de variables de decisión al establecer una edad mínima (e.g. 20 años) y máxima de cosecha (e.g. 40 años). En este caso se tiene 18 variables de decisión que se esquematiza a continuación:

			Clases de edad					
			j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
Superficie (ha) tiempo 0			300	500	150			
Periodos	t=1	10	R <sub>1</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>		
	t=2	20	R <sub>2</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>	Y <sub>24</sub>		
	t=3	30	R <sub>3</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub>	Y <sub>34</sub>		
	t=4	40	R <sub>4</sub>	Y <sub>42</sub>	Y <sub>43</sub>	Y <sub>44</sub>		
	t=5	50	R <sub>5</sub>	Y <sub>52</sub>	Y <sub>53</sub>	Y <sub>54</sub>		
	t=6	60	R <sub>6</sub>	Y <sub>62</sub>	Y <sub>63</sub>	Y <sub>64</sub>		
	t=7	70		Y <sub>72</sub>	Y <sub>73</sub>	Y <sub>74</sub>		

\* En un modelo de estructura tipo III se debe incorporar un periodo adicional para dar consistencia al modelo (t=7).

\*\* Se incorpora una variable R<sub>i</sub> que representa la superficie regenerada en el periodo "t".

### b) Parámetros

Como parámetros fundamentales se establecen los rendimientos obtenidos al cosechar una hectárea de la clase de edad "j" (V<sub>j</sub>) y los ingresos netos descontados producto de cosechar dicha superficie (I<sub>ij</sub>). La siguiente tabla presenta dichos parámetros.

Periodos		Rendimiento (V <sub>j</sub> )			Ingresos Netos Descontados		
		(m <sup>3</sup> /ha) por clase de edad			(I <sub>ij</sub> ) (M\$/ha) por clase de edad		
		10 - 20	20 - 30	30 - 40	10 - 20	20 - 30	30 - 40
t=1	10	449	781	965	1528	2658	3284
t=2	20	449	781	965	707	1231	1521
t=3	30	449	781	965	328	570	705
t=4	40	449	781	965	152	264	326
t=5	50	449	781	965	70	122	151
t=6	60	449	781	965	33	57	70

### c) Función Objetivo

La función objetivo puede ser representada mediante la sumatoria de las superficies cosechadas (Y<sub>ij</sub>) por los ingresos netos descontados (I<sub>ij</sub>). Esto se expresa como:

$$\text{Max } z = 1528 Y_{12} + 2658 Y_{13} + 3284 Y_{14} + 707 Y_{22} + 1231 Y_{23} + 1521 Y_{24} + 328 Y_{32} + 570 Y_{33} + 705 Y_{34} + 152 Y_{42} + 264 Y_{43} + 326 Y_{44} + 70 Y_{52} + 122 Y_{53} + 151 Y_{54} + 33 Y_{62} + 57 Y_{63} + 70 Y_{64}$$

*d) Restricciones estructurales*

Para un modelo de estructura tipo III existen tres tipos de restricciones que se ejemplifican a continuación. Además el ejemplo permite sintetizar las restricciones d.1 y d.2 en un solo grupo dado que la superficie regenerada es la misma en ambos casos.

*d.1) La superficie cosechada en cada periodo debe ser inmediatamente regenerada.*

$$Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} = R_1$$

$$Y_{22} + Y_{23} + Y_{24} = R_2$$

$$Y_{32} + Y_{33} + Y_{34} = R_3$$

$$Y_{42} + Y_{43} + Y_{44} = R_4$$

$$Y_{52} + Y_{53} + Y_{54} = R_5$$

$$Y_{62} + Y_{63} + Y_{64} = R_6$$

*d.2) La superficie regenerada debe ser subsecuentemente cosechada*

$$R_1 = Y_{22} + Y_{33} + Y_{44}$$

$$R_2 = Y_{32} + Y_{43} + Y_{54}$$

$$R_3 = Y_{42} + Y_{53} + Y_{64}$$

$$R_4 = Y_{52} + Y_{63} + Y_{74}$$

$$R_5 = Y_{62} + Y_{73}$$

$$R_6 = Y_{72}$$

*d.3) La superficie al inicio del horizonte de planificación debe ser subsecuentemente cosechada*

$$Y_{12} + Y_{23} + Y_{34} = 300$$

$$Y_{13} + Y_{24} = 500$$

$$Y_{14} = 150$$

*e) Restricciones atribuibles a la ordenación*

*e.1) Restricciones de rendimiento no decreciente.*

Se establece que los rendimientos totales por periodo ( $R_t$ ) no deben decrecer en el tiempo. Esto se puede realizar tomando parejas de periodos sucesivos; y estableciendo que el rendimiento en un periodo no debe ser inferior al anterior:

$$\begin{aligned}
R_2 \geq R_1 & \Rightarrow R_2 - R_1 \geq 0 \\
R_3 \geq R_2 & \Rightarrow R_3 - R_2 \geq 0 \\
R_4 \geq R_3 & \Rightarrow R_4 - R_3 \geq 0 \\
R_5 \geq R_4 & \Rightarrow R_5 - R_4 \geq 0 \\
R_6 \geq R_5 & \Rightarrow R_6 - R_5 \geq 0
\end{aligned}$$

Pero;

$$\begin{aligned}
R_1 &= 449 Y_{12} + 781 Y_{13} + 965 Y_{14} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 1)} \\
R_2 &= 449 Y_{22} + 781 Y_{23} + 965 Y_{24} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 2)} \\
R_3 &= 449 Y_{32} + 781 Y_{33} + 965 Y_{34} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 3)} \\
R_4 &= 449 Y_{42} + 781 Y_{43} + 965 Y_{44} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 4)} \\
R_5 &= 449 Y_{52} + 781 Y_{53} + 965 Y_{54} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 5)} \\
R_6 &= 449 Y_{62} + 781 Y_{63} + 965 Y_{64} && \text{(Volumen total cosechado en el periodo 6)}
\end{aligned}$$

Entonces;

$$\begin{aligned}
R_2 - R_1 &= 449 Y_{22} + 781 Y_{23} + 965 Y_{24} - 449 Y_{12} - 781 Y_{13} - 965 Y_{14} \geq 0 \\
R_3 - R_2 &= 449 Y_{32} + 781 Y_{33} + 965 Y_{34} - 449 Y_{22} - 781 Y_{23} - 965 Y_{24} \geq 0 \\
R_4 - R_3 &= 449 Y_{42} + 781 Y_{43} + 965 Y_{44} - 449 Y_{32} - 781 Y_{33} - 965 Y_{34} \geq 0 \\
R_5 - R_4 &= 449 Y_{52} + 781 Y_{53} + 965 Y_{54} - 449 Y_{42} - 781 Y_{43} - 965 Y_{44} \geq 0 \\
R_6 - R_5 &= 449 Y_{62} + 781 Y_{63} + 965 Y_{64} - 449 Y_{52} - 781 Y_{53} - 965 Y_{54} \geq 0
\end{aligned}$$

De esta forma, la formulación del problema de ordenación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
\text{Max } z &= 1528 Y_{12} + 2658 Y_{13} + 3284 Y_{14} + 707 Y_{22} + 1231 Y_{23} + 1521 Y_{24} + 328 Y_{32} + 570 Y_{33} + \\
& \quad 705 Y_{34} + 152 Y_{42} + 264 Y_{43} + 326 Y_{44} + 70 Y_{52} + 122 Y_{53} + 151 Y_{54} + 33 Y_{62} + 57 Y_{63} + 70 Y_{64}
\end{aligned}$$

s.a.

$$\begin{aligned}
Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} - Y_{22} - Y_{33} - Y_{44} &= 0 \\
Y_{22} + Y_{23} + Y_{24} - Y_{32} - Y_{43} - Y_{54} &= 0 \\
Y_{32} + Y_{33} + Y_{34} - Y_{42} - Y_{53} - Y_{64} &= 0 \\
Y_{42} + Y_{43} + Y_{44} - Y_{52} - Y_{63} - Y_{74} &= 0 \\
Y_{52} + Y_{53} + Y_{54} - Y_{62} - Y_{73} &= 0 \\
Y_{62} + Y_{63} + Y_{64} - Y_{72} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{12} + Y_{23} + Y_{34} &= 300 \\ Y_{13} + Y_{24} &= 500 \\ Y_{14} &= 150 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 449 Y_{22} + 781 Y_{23} + 965 Y_{24} &- 449 Y_{12} - 781 Y_{13} - 965 Y_{14} \geq 0 \\ 449 Y_{32} + 781 Y_{33} + 965 Y_{34} &- 449 Y_{22} - 781 Y_{23} - 965 Y_{24} \geq 0 \\ 449 Y_{42} + 781 Y_{43} + 965 Y_{44} &- 449 Y_{32} - 781 Y_{33} - 965 Y_{34} \geq 0 \\ 449 Y_{52} + 781 Y_{53} + 965 Y_{54} &- 449 Y_{42} - 781 Y_{43} - 965 Y_{44} \geq 0 \\ 449 Y_{62} + 781 Y_{63} + 965 Y_{64} &- 449 Y_{52} - 781 Y_{53} - 965 Y_{54} \geq 0 \end{aligned}$$

La representación anterior corresponde a una estructura de programación matemática lineal, por lo que puede ser resuelto mediante la aplicación del algoritmo simplex. En la figura 7.1.11, se presenta la resolución entregada por LINDO (Linear Interactive Discrete Optimizer).

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 27		
OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	2778380.	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y12	0.000000	21.215992
Y13	381.407104	0.000000
Y14	150.000000	0.000000
Y22	209.101990	0.000000
Y23	300.000000	0.000000
Y24	118.592903	0.000000
Y32	425.186310	0.000000
Y33	322.305115	0.000000
Y34	0.000000	49.173767
Y42	633.562927	0.000000
Y43	202.508575	0.000000
Y44	0.000000	65.704880
Y52	787.640930	0.000000
Y53	113.928513	0.000000
Y54	0.000000	89.004494
Y62	901.569458	0.000000
Y63	48.430557	0.000000
Y64	0.000000	121.626564
Y74	0.000000	1538.527344
Y73	0.000000	884.735901
Y72	950.000000	0.000000

Figura 7.1.11 Solución óptima al problema de ordenación propuesto (tipo III) utilizando LINDO (Schrage, 1981)

Se encontró una solución óptima después de 27 iteraciones con un valor presente neto (VPN) de M\$ 2.778.380. La política de corta adoptada permite cosechar 442.623 m<sup>3</sup> en cada periodo de 10 años, o

lo que es equivalente 44.262 m<sup>3</sup> por año. El rodal A se cosechará completamente al final del segundo periodo ( $Y_{23}=300$  ha). En el rodal B se cosecharán 381 ha en el primer periodo ( $Y_{13}$ ) y 119 ha en el segundo periodo ( $Y_{24}$ ). El rodal C será cosechado completamente en el primer periodo ( $Y_{14}=150$  ha). Posterior a ello las superficies regeneradas pierden la identidad de los rodales (al igual que en un modelo de estructura tipo II).

#### **-Fin Ejemplo**

Sería artificioso tratar de establecer la superioridad de una estructura de modelo sobre otro. En la práctica, depende de la situación bajo análisis y de los objetivos de quien toma las decisiones. Además, estas estructuras (I,II y III) pueden ser tomados como guía para la proposición de nuevos modelos, pero no representan un absoluto; y muy por el contrario es el planificador quien diseñará un modelo que represente en mejor forma el sistema bajo análisis.

Estos modelos (I, II y III) generalmente serán utilizados en la planificación estratégica de un patrimonio, de una región o de un país. Debido a ello, generalmente se utilizará información bastante agregada, que permitirá delinear la política global de intervención de un patrimonio. Para planificación más detallada, se recurrirá a otros modelos que considerando la estrategia global permitan detallar cómo, cuándo y dónde intervenir sobre un horizonte de tiempo menor (e.g. 5 años) Generalmente estos modelos (I, II y III) no trabajarán con rodales individuales sino que con una agregación de rodales similares en cuanto a las características físicas, vegetacionales y de desarrollo. En Nueva Zelanda se utiliza el concepto de croptype para señalar una agregación de rodales similares que poseen un objetivo común pero que no necesariamente tienen la misma edad.

#### 7.1.3.4 Modelos de ordenación de nivel táctico

La resolución del problema de ordenación a nivel estratégico provee las bases para llevar a cabo la planificación en los niveles inferiores. Mediante la resolución de este problema, se define la estrategia silvicultural y de ordenación que se debiera adoptar para conducir el bosque de su condición actual a su condición ideal. Como resultado de utilizar información agregada, se sabe cómo, cuándo y dónde intervenir a nivel de cuarteles pero no necesariamente a nivel de rodales, por lo cual se debe recurrir a modelos de ordenación de nivel táctico, que tomando las grandes decisiones del nivel estratégico, permitan programar espacial y temporalmente las intervenciones silviculturales a nivel de rodales.

A nivel táctico, existe una gran cantidad de modelos de ordenación, dentro de los cuales cobran gran importancia aquellos que consideran restricciones espaciales y de borde. La importancia de este tipo de restricciones se encuentra bien documentada en la literatura. En general, se establece que el manejo de patrones espaciales permite establecer corredores biológicos, preservar los paisajes, dar estabilidad al ecosistema, y mantener la diversidad biológica, entre otras.

Desde la perspectiva de modelación y análisis, las restricciones espaciales pueden ser difíciles de representar e imponer. Existen dos enfoques potenciales que pueden ser aplicados en ordenación. El primero (Modelo de Restricción de Unidades o MRU) consiste en evaluar las unidades de manera que éstas no superen un área máxima permitida. Entonces se puede aplicar un modelo matemático para asegurar que unidades adyacentes no sean simultáneamente cosechadas. El segundo enfoque (Modelo de Restricción de Área o MRA) se basa en unidades significativamente más pequeñas que el área máxima permitida, donde unidades adyacentes pueden ser cosechadas simultáneamente, mientras el área contigua total no exceda el límite superior (Murray, 1999).

La diferencia entre estos dos enfoques (MRU y MRA) se ilustra en la figura 7.1.12 usando un área común. En la figura (a) se han definido unidades espaciales de un área inferior a un máximo permitido, de manera que se deben asignar restricciones para asegurar que dos unidades adyacentes no sean intervenidas simultáneamente (MRU). La figura (b) muestra unidades mucho más pequeñas que las de la figura (a). De hecho son un subconjunto de las unidades de la figura (a). De esta forma, unidades adyacentes pueden ser intervenidas simultáneamente siempre que el área conjunta no exceda del máximo permitido.

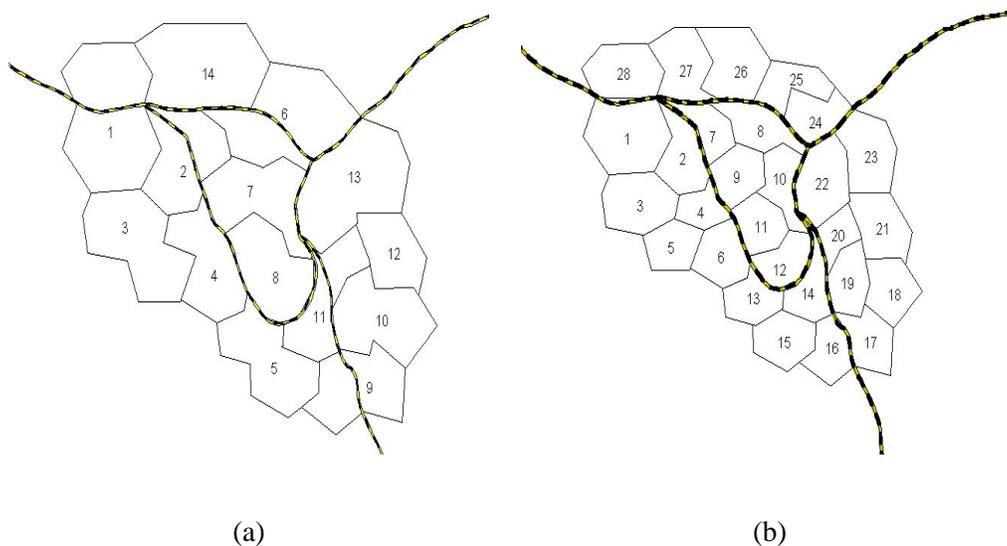


Figura 7.1.12: Unidades de un área de bosques común para ilustrar las diferencias entre MRU y MRA.

#### MODELO DE RESTRICCIÓN DE UNIDADES (MRU)

Para un patrimonio como el de la figura 7.12 (a), el modelo de restricción de unidades puede ser resuelto mediante programación matemática entera. Para ello se debe formular, resolver e

interpretar el problema. La formulación se logra al explicitar variables de decisión, parámetros, funciones objetivos y restricciones.

*a) Variables de Decisión*

$I_{it}$  Variable Entera Binaria (0-1) que implica el valor verdadero (1) si la unidad  $i$  se interviene en el periodo  $t$ , y el valor falso (0) si esta no es intervenida.

*b) Parámetros*

$A_i$  Area (ha) de la unidad “ $i$ ”

$VPN_{it}$  Valor presente Neto (\$/ha) de intervenir la unidad “ $i$ ” en el periodo “ $t$ ” a lo largo del horizonte de planificación

$V_{itk}$  Rendimiento ( $m^3$ ) de producto tipo “ $k$ ” que se genera en la unidad “ $i$ ” en el periodo “ $t$ ”.

$C_k^*$  Posibilidad en volumen de producto tipo  $k$  ( $m^3/año$ ). Este valor se deriva de la resolución del problema de ordenación a nivel estratégico.

*c) Función Objetivo*

El objetivo consiste en maximizar el valor presente neto de programar espacial y temporalmente las intervenciones silviculturales:

$$Max \quad z = \sum_{i=1}^n a_i \sum_{t=1}^T VPN_{it} I_{it} \quad (0)$$

*d) Restricciones*

Las restricciones estructurales consisten en establecer que cada unidad que compone el patrimonio debe ser intervenida a lo más una vez a lo largo del horizonte de planificación.

$$\sum_{t=1}^T I_{it} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Las restricciones de borde consisten en establecer que de verificarse la intervención de una unidad específica (unidad i) las unidades vecinas no deben ser intervenidas (el conjunto de unidades vecinas se designa por K).

$$I_{it} + \sum_{k \in K} I_{kt} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n ; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

Además pueden existir restricciones de flujo, que limiten la cosecha a la posibilidad de corta determinada en la resolución del problema de ordenación a nivel estratégico ( $C_k^*$ ), considerando una holgura dada por una banda determinada por un máximo aumento y disminución porcentual permitida (e.g.  $\alpha = 0.1$  equivalente a un 10 %, y  $\beta = 0.05$  equivalente a 5 %).

$$\sum_{i=1}^n a_i \sum_{t=1}^T V_{it}^k I_{it} \leq C_k^* (1 + \alpha) \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i \sum_{t=1}^T V_{it}^k I_{it} \geq C_k^* (1 - \beta) \quad \forall k \in K \quad (4)$$

#### MODELO DE RESTRICCIÓN DE ÁREA (MRA)

La formulación del modelo de restricción de área (MRA) es exactamente igual que el modelo de restricción de unidades, excluyendo las restricciones de borde. Además se agrega una función recursiva ( $f_{it}$ ) que suma la superficie de unidades vecinas de i que son tratadas en el periodo t, cuando  $I_{it} = 1$ . De esta forma se asegura que la suma de las unidades tratadas es inferior a la máxima área contigua permitida.

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^n a_i \sum_{t=1}^T VPN_{it} I_{it}$$

sujeto a :

$$(1), (3), (4)$$

$$f_{it}(I) \leq A \quad \forall i, t \quad (6)$$

Los modelos de restricción de área y de unidades se formulan utilizando una gran cantidad de variables enteras binarias. Por ejemplo, para planificar las intervenciones de 1.000 rodales en 10

años, se requieren 10.000 variables enteras binarias (1.000 x 10), por lo cual generalmente se utilizarán métodos heurísticos para su resolución, como son programación entera vía proceso Montecarlo, Simmulated Annealing o Tabu Search.

#### 7.1.4 Ordenación bajo múltiples objetivos

En la actualidad, muchos de los problemas de decisión en relación con recursos naturales, consideran múltiples objetivos de uso. Los bosques claramente cumplen una función de producción y protección, las cuales no son necesariamente excluyentes. Dentro de los objetivos de uso se encuentra la producción de maderas, frutos y cortezas, la recreación, la conservación de la biodiversidad y la protección de suelos y aguas, entre otros. Algunos de estos usos pueden encontrarse en conflicto (Dykstra, 1984), como usualmente sucede entre la producción maderera y la protección de la fauna amenazada.

Cuando existen múltiples objetivos de uso, resulta muy difícil que la misma decisión sea la mejor para todos los objetivos simultáneamente. Aquello que es considerado mejor para algunos, puede no serlo para otros, de manera que se requiere buscar un compromiso entre los objetivos planteados. Este compromiso puede ser influenciado por factores intangibles, por actitudes personales y por los valores de quien toma decisiones (Daellenbach *et al.*, 1983).

Probablemente la técnica más ampliamente utilizada cuando existen objetivos en conflicto es programación por múltiples objetivos, la cual corresponde a una extensión de programación lineal. La programación por múltiples objetivos minimiza las desviaciones entre el máximo valor alcanzable para cada objetivo, y lo que se alcanza producto del conflicto entre los mismos. Así, la función objetivo puede ser expresada como la minimización de desviaciones ponderadas, sujeta a restricciones físicas y restricciones de los objetivos de uso del recurso.

A pesar de la gran flexibilidad de programación por múltiples objetivos, esta requiere la cuantificación explícita de los máximos niveles de logro de los objetivos y una estructura de preferencias que define las ponderaciones que el tomador de decisiones asigna a cada uno de los objetivos con relación a los otros. La dificultad en la especificación de los máximos niveles de logro y la estructura de preferencias, ha sumido a la programación por múltiples objetivos en fuerte controversia (Dykstra, 1984).

Sin embargo, esto no necesariamente constituye una desventaja, ya que esta herramienta permite explorar como distintos actores sociales actuarían en la asignación de recursos, pudiendo compararse entre ellos las distintas estrategias y los posibles aspectos de conciliación. Además, normalmente la información con que se cuenta es sólo parcialmente confiable, y esto sumado a la

incertidumbre de los horizontes de tiempo involucrados y de las funciones de producción, hace necesario enfatizar las tendencias más que los resultados absolutos.

A modo de ejemplo, consideremos una propiedad que posee 100 ha de bosque que pueden ser asignados a dos sistemas silviculturales alternativos y mutuamente excluyentes: talarrasa en fajas y cortas sucesivas. Consideremos en este sistema simplificado, la existencia de un objetivo económico y un objetivo ambiental. Estos objetivos deben ser medidos a través de criterios de desempeño. El objetivo económico puede ser medido por los ingresos netos descontados que se generan por la venta de la madera, mientras que el objetivo ambiental a través de un indicador de biodiversidad, pérdida de suelos o calidad de aguas, entre otros. Este último se expresa en términos de unidades ambientales arbitrarias (u.a.).

Cuadro 7.1.9. Especificación de valores económicos y ambientales para dos sistemas silviculturales alternativos.

Objetivo	Valor asociado al sistema silvicultural	
	Talarrasa en fajas	Cortas Sucesivas
Económico (M\$ / ha)	500	250
Ambiental (u.a. / ha)	30	47

El cuadro 7.1.9 implica que de asignar una hectárea a talarrasa en fajas se contribuiría en 500 M\$ al objetivo económico y 30 u.a. al objetivo ambiental. Por otro lado al asignar una hectárea a cortas sucesivas, se contribuiría en 250 M\$ al objetivo económico y 47 u.a. al objetivo ambiental. Se observa que ambos objetivos operan en direcciones diferentes. Mientras los mayores valores económicos se encuentran al asignar una hectárea a talarrasa en fajas, los mayores valores ambientales se obtienen al asignar una hectárea a cortas sucesivas. Entonces se debe buscar un compromiso entre ambos objetivos, sabiendo que no se puede lograr simultáneamente el máximo valor económico (50.000 M\$ al asignar 100 ha a talarrasa en fajas) y el máximo valor ambiental (4.700 u.a. al asignar 100 ha a cortas sucesivas).

El problema queda representado al explicitar variables de decisión, parámetros, funciones objetivo y restricciones.

a) *Variable de decisión*

$X_T$  : superficie (ha) asignada a talarrasa en fajas

$X_{CS}$  : superficie (ha) asignada a cortas sucesivas

b) *Parámetros*

Los parámetros corresponden a los valores económicos y ambientales asignados a cada sistema silvicultural.

c) *Funciones objetivos*

$$\text{Max } Z_1 = 500 X_T + 250 X_{CS} \quad (\text{Valor Económico})$$

$$\text{Max } Z_2 = 30 X_T + 47 X_{CS} \quad (\text{Valor Ambiental})$$

d) *Restricciones*

La superficie asignada a talarrasa en fajas y cortas sucesivas debe ser menor o igual a 100 ha. Esto se expresa como:

$$X_T + X_{CS} \leq 100$$

Excepto por una coincidencia, el máximo valor de las dos funciones objetivo no será obtenido con los mismos valores de las variables de decisión. En el ejemplo, el máximo valor del objetivo económico es 50.000 M\$ que resulta de asignar 100 ha a talarrasa en fajas, mientras que el máximo valor del objetivo ambiental se alcanza al asignar toda la superficie a cortas sucesivas (4.700 u.a.). Ninguna solución factible excederá estos máximos, y no pueden ser logrados simultáneamente para ambos objetivos. Por tanto, cualquier solución deberá ser un compromiso. La variable  $S_k$  representa el diferencial entre el pleno logro del objetivo  $k$  y lo que realmente se obtuvo al considerar varios objetivos simultáneamente. Así, cada objetivo puede ser planteado como una restricción adicional:

$$500 X_T + 250 X_{CS} + S_1 = 50.000 \quad (\text{Valor Económico})$$

$$30 X_T + 47 X_{CS} + S_2 = 4.700 \quad (\text{Valor Ambiental})$$

Como criterio de optimización se puede minimizar las distancias desde la solución ideal. En general, se consideran las desviaciones porcentuales, porque resulta más fácil establecer compromisos entre objetivos. Esto se logra redefiniendo cada variable  $S$  en términos de la desviación porcentual  $V_k$  del máximo logro  $T_k$  ( $V_k = S_k / T_k$  ó  $S_k = T_k V_k$ ). Si utilizamos como

criterio de optimización el minimizar la suma ponderada de las desviaciones obtenemos la formulación MINSUM, que se expresaría de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l}
 \text{Min } W_1 V_1 + W_2 V_2 \\
 \text{s.a.} \\
 500 X_T + 250 X_{CS} + 50.000 V_1 = 50.000 \\
 30 X_T + 47 X_{CS} + 4.700 V_2 = 4.700 \\
 X_T + X_{CS} \leq 100
 \end{array}$$

En la formulación MINSUM la solución óptima ocurrirá en un punto extremo de la región factible de las restricciones originales. Resulta importante notar que aún pequeños cambios en los pesos ( $W_1, W_2$ ) pueden cambiar abruptamente la solución mediante un salto a un punto adyacente extremo de la región factible. Sin embargo, esto es contrario a lo que la intuición indicaría. Un tomador de decisiones esperaría que la solución óptima respondiera gradualmente a pequeños cambios en la estructura de pesos.

Otro enfoque aplicado en la resolución del problema, es el de la formulación MINMAX que consiste en la minimización de la máxima desviación. En este caso las variables de desviación individuales se reemplazan por una única variable de desviación  $V$ , la cual mide la máxima desviación fraccional de cualquier objetivo desde el ideal. Lo anterior implica que las restricciones de objetivos que tenían signo  $=$  en la formulación MINSUM, pasan a tener signo  $\geq$  en la formulación MINMAX. Así, la formulación MINMAX para el problema en cuestión sería la siguiente:

$$\begin{array}{l}
 \text{Min } V \\
 \text{s.a.} \\
 500 X_T + 250 X_{CS} + 50.000 V \geq 50.000 \\
 30 X_T + 47 X_{CS} + 4.700 V \geq 4.700 \\
 X_T + X_{CS} \leq 100
 \end{array}$$

Por lo general, la solución óptima para este nuevo problema no se ubicará en un punto extremo de la región factible conformada por las restricciones originales, pero ocurrirá en algún lugar en la frontera entre dos puntos extremos. Mientras mayor sea la ponderación asignada a un objetivo, mayor será el porcentaje de logro de él. Este es un atributo de la formulación MINMAX y como

resultado de ello, la solución óptima responde gradual y suavemente a los cambios en los pesos. La formulación MINMAX también tiende a dar una distribución más equitativa de los porcentajes de logro que la formulación MINSUM (Daellenbach *et al.*, 1983)

El mayor atractivo de las formulaciones MINSUM y MINMAX radica en su simplicidad y del hecho que el problema original de múltiples objetivos es convertido en un problema de programación lineal tradicional, y por tanto la solución puede ser encontrada usando el método simplex.

### 7.1.5 Ordenación bajo distintos estados del ambiente

En general, cualquier modelo de decisión y en particular, cualquier modelo de ordenación, puede ser clasificado de acuerdo al grado de certidumbre que se tiene en relación al resultado futuro de una decisión tomada hoy. De esta forma, las decisiones pueden ser realizadas bajo distintos estados del ambiente: certidumbre, incertidumbre y riesgo (Davis y Johnson, 1987).

Las decisiones se toman bajo certidumbre, cuando el resultado futuro de una decisión adoptada hoy es exactamente conocido y por lo tanto el curso de acción que presenta el mejor resultado futuro es elegido. Raramente esta situación se da en el mundo real, de hecho se bromea diciendo que solo hay dos cosas que ocurren con certeza en la vida que son la muerte y los impuestos.

Las decisiones se toman bajo incertidumbre, cuando existen varios posibles resultados futuros para una decisión adoptada hoy, pero no se tiene la menor idea respecto de cual de ellos es el más probable. En estos casos generalmente se analizan distintos escenarios para identificar las variables críticas. La toma de decisiones bajo incertidumbre generalmente es controlada a través de un análisis de sensibilidad, donde se considera que sucedería si tal o cual variable se modificara. En modelos lineales de ordenación es común utilizar el análisis de sensibilidad que provee el método Simplex, a través de precios sombras y costos reducidos.

Se toman decisiones bajo riesgo cuando es posible asignar probabilidades de ocurrencia a todos los posibles resultados de una decisión adoptada hoy. Una vez que las probabilidades son conocidas, algunos cálculos pueden ayudar a guiar las decisiones, aún cuando no se conoce con certeza cual evento ocurrirá (Davis y Johnson, 1987). De esta forma, la elección de la mejor decisión puede ser basada en el máximo valor esperado; que es, la suma de todos los posibles resultados ponderado por sus correspondientes probabilidades de ocurrencia. Alternativamente, se puede usar un criterio de pérdida de oportunidad esperada (Gottfried, 1984).

A modo de ejemplo, Bown y Bilek (1997) desarrollaron un modelo de ordenación para planificar la cosecha forestal en el tiempo cuando existe riesgo de ocurrencia de eventos catastróficos. El modelo se basa en simulación y optimización. El modelo de optimización busca el patrón óptimo de cosecha, sin considerar la ocurrencia de eventos catastróficos. El modelo de simulación modifica el patrón óptimo basado en una función de riesgo aleatorio evaluando el comportamiento del sistema a través de valor presente neto (VPN).

Se evaluó mediante el modelo un patrimonio forestal de 8.412 ha localizadas en la región de Canterbury en Nueva Zelanda. Tormentas de viento fueron generadas aleatoriamente sobre un horizonte de planificación de 50 años considerando un período de retorno de 28 años entre dos tormentas sucesivas. La Figura 7.1.13 presenta la distribución de frecuencias de VPN considerando clases de 2MM\$ (dólares neocelandeses) en base de 1.100 simulaciones.

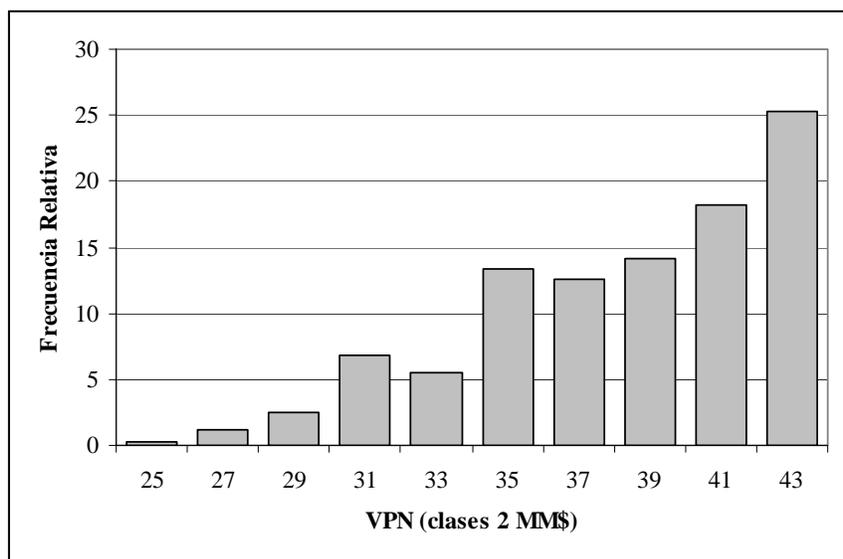


Figura 7.1.13 Distribución de Valor Presente Neto para Selwyn Plantation Board Limited bajo riesgo de caída masiva de árboles por viento.

La distribución es creciente en frecuencia relativa (probabilidad) desde los menores a los mayores valores de VPN, lo que implica que existen mejores chances de obtener un VPN cercano a los máximos valores que a los mínimos. Los menores VPN se asocian a casos a tormentas frecuentes concentradas al inicio del horizonte de planificación. Los mayores valores de VPN se asocian a casos donde no ocurren tormentas de viento o estas ocurren muy hacia el final del horizonte de planificación. Se aprecia que bajo cualquier escenario, el manejo de los bosques continuará siendo rentable.

El volteo por viento produjo pérdidas económicas debido a la reducción en la tasa de cosecha en períodos posteriores a la ocurrencia de la tormenta, al aprovechamiento de un volumen inferior al esperado bajo condiciones normales (80%) y al hecho de que los árboles son cosechados antes de que alcancen la rotación óptima. Sin embargo, dado que el fenómeno puede ser modelado, existen decisiones que pueden ser adoptadas para reducir los niveles de riesgo.

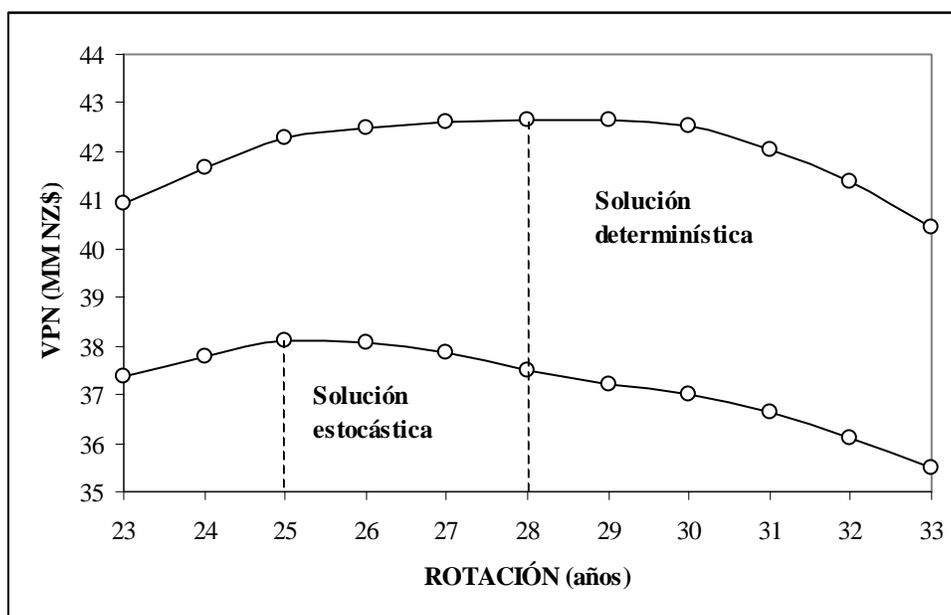


Figura 7.1.14: Valor Presente Neto (MM NZ\$) en función de la longitud de la rotación para Selwyn Plantation Board Limited.

En la figura 7.1.14 se presenta los VPN para distintas longitudes de rotación, considerando soluciones determinísticas (donde no ocurre caída masiva de árboles) y estocásticas (donde sí ocurre).

Bajo condiciones determinísticas la rotación óptima se encuentra cuando los árboles son cosechados a los 28 años, mientras que bajo condiciones estocásticas cuando son cosechados a los 25 años. De esta forma el riesgo de ocurrencia de caída masiva de árboles ha reducido la rotación óptima en tres años. Esta es información valiosa que puede ser utilizada para reducir los niveles de riesgo.

### 7.1.8. Referencias bibliográficas

- ALLISON, B. J. 1986. Forest resource maturity simulator-RMS. Users' Guide. N.Z. Forest Products Limited.
- BOWN, H. y BILEK, E. M. 1997. Windthrow economics at the forest level in the Canterbury Region, New Zealand. Symposium on Systems Analysis in Forest Resources. Traverse City, Michigan. May 28.31, 1997.
- BUONGIORNO, J. y GILLES, J.K. 1987. Forest management and economics. Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- CURTIS, F. H. 1962. Linear programming the management of a forest property. Journal of Forestry. (September): 611-616.
- DAVIS, L. S. y JOHNSON, K. N. 1987. Forest management. Third Edition. McGraw Hill New York, USA.
- DAELLENBACH, H. G., GEORGE, J. A. y MCNICKLE, D. C. 1983. Introduction to operations research techniques. Allyn and Bacon, Inc. Second Edition.
- DUBOURDIEU, J. 1993. Manual de Ordenación de Montes. Office National del Forêts. Traducido por Antonio Prieto Rodríguez y Manuel López Quero. Editorial Paraninfo, Madrid, España.
- DYKSTRA, D. P. 1984. Mathematical programming for natural resource management. McGraw-Hill, New York, USA.
- GUNN, E. 1991. Some aspects of Hierarchical planning in forest management. En: Proceedings: 1991 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources. March 3-6, 1991. Charleston, South Carolina.
- GARCIA, O. 1981. IFS, an interactive forest simulator for long range planning. New Zealand Journal of Forestry Science **11**(1): 8-22.
- GARCIA, O. 1984. FOLPI, a forestry-oriented linear programming interpreter. Proceedings of the IUFRO Symposium on Forest Management Planning and Managerial Economics. University of Tokio, Japan.
- GOTTFRIED, B. 1984. Elements of stochastic simulation. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. U.S.A.
- JOHNSON, K.N. y SCHEURMAN, H.L. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - Discussion and Synthesis Monograph No 18. Forest Science.
- LEUSCHNER, W. A. 1992. Introduction to forest resource management. Krieger Publishing Company.

- LOUCKS, D. P. 1964. The development of an optimal program for sustained-yield management. *Journal of Forestry* 62: 485-490.
- MADRIGAL, A. 1995. Ordenación de Montes Arbolados. Colección Técnica ICONA. Madrid, España.
- MCDILL, M. 1998. Forest Resource Management. Draft chapters written by Dr. McDill. Louisiana State University.
- MENDOZA, M. A. 1993. Conceptos Básicos de Manejo Forestal. Uteha, Noriega Editores, México.
- MURRAY, A. 1999. Spatial restrictions in harvest scheduling. *Forest Science* 45(1): 45-52.
- NAUTIYAL, J.C. y PEARSE, P. H. 1967. Optimizing the conversion to sustained yield - A programming solution. *Forest Science* 13(2): 131-139.
- SCHRAGE, L. 1981. User's Manual for LINDO, Scientific Press, Palo Alto, Calif.
- VILLANUEVA, T. 1992. Integrated yield forecasting and harvest scheduling in a tropical pine plantation in Fiji. Ph.D Thesis. School of Forestry. University of Canterbury. N. Zealand.
- WHYTE, G. 1994. Principles of Management. Course Notes 1994 Academic Year. New Zealand School of Forestry, University of Canterbury.