UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

PROBLEMAS Y MODELOS EN EL MANEJO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO FORESTAL.

(Departamento de Manejo y Economía Forestal)

Prof. Guía: Ingeniero Forestal Sr. HERNAN CORTES SALAS

OSCAR GARCIA VIDAL

SANTIAGO DE CHILE

1968

A MIS PADRES

PROFESORES INFORMANTES DE TESIS

Sr. HERNAN CORTES SALAS : 7

Sr. ARNOLDO CONTRERAS HERMOSILLA : 7

Sr. ANTONIO GILCHRIST MORENO : 7

VISTO BUENO DEL PROFESOR GUIA

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. FORMULACION DEL PROBLEMA	4
OBJETIVOS	4
ALTERNATIVAS DE MANEJO	5
EFECTIVIDAD	6
Medida de efectividad	6
Criterio de alternativa óptima	9
EL PROBLEMA DE ESTUDIO	10
CAPITULO 2. EL MODELO	11
MODELOS DE EVALUACION	14
MODELOS DE PRECIOS Y COSTOS	17
MODELOS DEL BOSQUE	18
Regulación del bosque	18
Modelos de rodal	22
Modelos determinísticos	22
Modelos estocásticos	28
CAPITULO 3. OPTIMIZACION	32
SIMULACION	32
PROGRAMACION DINAMICA	35
CAPITULO 4. IMPLEMENTACION Y CONTROL	39
IMPLEMENTACION	39
CONTROL	41
CONCLUSIONES	43

APENDICE. UN MODELO SIMPLE DE RODAL Y SU SIMULACION

ANALOGA..... 45

MODELO..... 45

SIMULACION..... 48

RESUMEN..... 55

SUMMARY..... 57

BIBLIOGRAFIA..... 59

I N T R O D U C C I O N

Desde antiguo el manejo de los bosques ha sido efectuado generalmente en base a consideraciones silviculturales, técnicas y de regulación del bosque (32). Los objetivos del manejo han estado determinados en gran parte por principios tradicionales y opiniones subjetivas acerca de lo que es un "buen manejo".

Ultimamente, sin embargo, ha habido una fuerte tendencia hacia una concepción económica del manejo. Se trata de determinar el manejo óptimo en relación a objetivos económicos. Es así como ha aparecido una cantidad apreciable de publicaciones proponiendo diversos modelos matemáticos y técnicas de optimización, como la programación lineal y la programación dinámica, para afrontar algunos problemas del manejo. En Chile se han hecho también estudios sobre el manejo económico del pino insigne (23,77,80,87).

Han contribuído en forma importante a esta orientación del manejo, primero el análisis económico clásico y luego las técnicas e ideas de la investigación de operaciones. La aparición y generalización del uso de los computadores electrónicos ha sido fundamental, permitiendo la aplicación rápida y económica de métodos que no serían factibles sin el uso de estos elementos.

Este proceso de introducción de nuevos criterios y técnicas ha dado lugar a una situación bastante confusa de la teoría del manejo forestal. Coexisten en la literatura conceptos del análisis marginal clásico con modelos matemáticos de distintos tipos, principios silvícolas tradicionales, métodos modernos de optimización y normas más o menos empíricas. Se hace sentir entonces la necesidad de un tratamiento unificado del manejo de bosques, considerado éste como un problema de decisión. Un problema de decisión consiste en elegir de entre un conjunto de alternativas posibles aquella más eficien-

te en relación a los objetivos definidos previamente.

En este trabajo se plantearán las bases conceptuales para el desarrollo de modelos de decisión en el manejo forestal, y se analizarán desde este punto de vista los antecedentes con que se cuenta en la actualidad, los problemas que se encuentran y posibles formas de abordarlos. A pesar de que, para tratar el tema de una manera más concreta, se ha restringido la discusión al manejo de plantaciones, gran parte de los conceptos planteados son aplicables a otros tipos de bosques.

En el enfoque adoptado para abordar la teoría el manejo se ha tomado parte de las ideas y de la terminología de la investigación de operaciones y de la teoría del control. La investigación de operaciones (1, 30,41,70,73) es una disciplina que se desarrolló en forma acelerada a partir de la Segunda Guerra Mundial y estudia científicamente, poniendo énfasis en un enfoque cuantitativo, las decisiones en la operación de sistemas complejos. Se caracteriza principalmente por el uso de modelos matemáticos como hipótesis básicas y por una visión global de los problemas. La teoría del control (7,10) se han estudiado eepecialmente en relación al diseño de servomecanismos y al control automático de procesos. No obstante sus alcances son muchos más extensos. Citando a Bellman (7): " El objetivo amplio de una teoría del control es hacer que un sistema - qualquier tipo de sistema- opere en una forma más deseable; hacerlo más seguro, más conveniente o más económico."

Los capítulos en que se ha estructurado la exposición del tema corresponden a las fases principales de un proyecto de investigación de operaciones (30). Debe hacerse notar sin embargo, que raramente se completa un proyecto ejecutando las distintas fases en el orden indicado. Es común por ejemplo, que la formulación del problema no se complete hasta tener el proyecto virtual-

mente terminado. Generalmente durante una investigación se pasa continuamente de una fase a otra, considerando incluso varias fases simultáneamente, ya que existe una estrecha interrelación entre ellas.

CAPITULO I

FORMULACION DEL PROBLEMA

A grandes rasgos, se puede definir el problema del manejo como la operación óptima de un predio forestal. Para abordar el problema es necesario detallar más este planteamiento.

La persona o grupo de personas que decide cómo operar el predio tiene frente a si un objetivo u objetivos que trata de lograr. Ademas dispone de dos o más alternativas de acción en la operación del sistema. La determinación de la alternativa óptima en relación a los objetivos exige que se especifique una medida de efectividad.

Examinemos con más detalle estos conceptos.

OBJETIVOS.-

El objetivo general del manejo del bosque, suponiendo un comportamiento racional, es obtener de él el máximo beneficio. Sin embargo, del bosque pueden obtenerse beneficios de distintos tipos: madera, protección contra la erosión, contra avalanchas, contra el viento, regulación de las aguas, caza, forraje, esparcimiento, embellecimiento del paisaje, facilitar la obtención de créditos, exención de impuestos, posición social, absorción de mano de obra, etc. Todos estos beneficios pueden considerarse como objetivos.

La importancia relativa de los distintos objetivos para quien hace las decisiones dependerá principalmente del régimen de propiedad del predio, de su ubicación y características físicas, y de las condiciones económicas y legales.

Es esencial para la formulación del problema el reconocer los objetivos afectados por las alternativas de manejo y su importancia relativa.

ALTERNATIVAS DE MANEJO.-

En la operación de un predio forestal se enfrentan alternativas de acción en diversos aspectos. Por ejemplo, tenemos en primer lugar la opción de decidir entre la operación del predio o su venta, con cambio de rubro. Se presentan alternativas de acción también en cuanto a la adquisición de terrenos vecinos, en el uso del predio, en la elección de especies, tratamiento silvícola, métodos y equipos de explotación, uso de fertilizantes, limpias, podas, raleos, etc. La decisión entre todas estas posibles alternativas de acción en la forma más conveniente a sus objetivos es lo que es llamado a veces el " problema del ejecutivo", para distinguirlo del "problema de estudio" (research problem) que es el que se plantea el analista (30) y que es generalmente una idealización del problema del ejecutivo.

En el paso del problema del ejecutivo al problema de estudio, se determinan las alternativas a considerar para la optimización, y se adopta una medida de efectividad que permita evaluar las alternativas en relación a los objetivos.

Al formular el problema de estudio pueden eliminarse alternativas posibles por diversas razones. En algunos casos investigaciones previas pueden haber demostrado la impracticabilidad de algunas alternativas. En otros puede estar claro que violarían restricciones planteadas en los objetivos. Otras alternativas pueden no tomarse en cuenta si la evidencia disponible indica que, en relación a las dificultades de incluírlas en el análisis y su posible incidencia en los resultados, no es práctico considerarlas.

Por último, puede subdividirse el problema en problemas parciales, cada uno de los cuales consiste en optimizar la decisión entre algunas de las alternativas, manteniendo fijas las demás. En lo posible estos problemas parciales deben ser independientes entre sí, de modo que optimizando para cada uno de los problemas se consiga el ópti-

mo de toda la operación. Sin embargo, en algunos casos no se conocen métodos para optimizar simultáneamente decisiones interdependientes, debiéndose entonces adoptar soluciones aproximadas o proceder por aproximaciones sucesivas.

De esta manera el problema del manejo de las plantaciones forestales viene a ser una parte de un problema más amplio. Generalmente se consideran como materia del manejo de las plantaciones las decisiones referentes a:

- Cuándo y donde efectuar cortas finales (problemas de regulación y rotación.)
- Cuando, donde y con que intensidad ralear.
- Cuando, donde y a que altura podar.
- Diámetros límites de utilización.
- Distancia de plantación.

Las decisiones referentes a las demás alternativas de acción en la operación del predio se suponen objeto de otras especialidades forestales.

EFECTIVIDAD.-

Medida de efectividad.-

Para determinar la alternativa óptima es necesario, en primer lugar, evaluar los resultados de la operación en relación a los objetivos. Tal evaluación requiere de una medida numérica del grado en que un resultado satisface los objetivos. Esta medida recibe el nombre de medida de efectividad, y es un intento de representar en el problema de estudio los objetivos planteados en el problema del ejecutivo. Cabe señalar que algunos objetivos pueden actuar en la forma de restricciones en los valores de las variables.

Si los resultados de una operación tienen incidencia en relación a diversos objetivos, debe tratarse de expresar estos efectos en una misma unidad de medida. Por ejemplo, si un bosque

tiene como objetivos producir madera y, al mismo tiempo, proteger del viento cultivos agrícolas vecinos, variando este grado de protección según las alternativas del manejo, en la medida de eficiencia podría sumarse al valor de la madera producida el valor de las pérdidas que se producirían en los terrenos agrícolas si el bosque no existiera. Una discusión detallada sobre el problema de la evaluación en relación a objetivos múltiples en una misma unidad de medida, y del tratamiento de los objetivos cualitativos (intangibles) puede encontrarse en Churchmann et alii (30.)

En el manejo de bosques generalmente la medida de efectividad se expresa en términos monetarios. La valorización de los insumos y productos (incluídos los beneficios accesorios) en el caso del empresario privado que busca el máximo beneficio económico debe hacerse a precio de mercado. Si el bosque es público es necesario tomar en cuenta los beneficios indirectos que puede aportar a la comunidad, como absorción de mano de obra desocupada, reducción de importaciones, etc. La forma más conveniente de incluir estos factores es usando la misma medida de efectividad que en el caso de un bosque privado, pero valorando los insumos y productos a precios y costos de oportunidad (véase p. ej. 24).

La medida de efectividad para evaluar planes de manejo puede tomar la forma de un ingreso neto total actualizado o de una tasa interna de retorno dependiendo de las características de la empresa. En lugar del ingreso neto total actualizado podría también usarse en forma equivalente el ingreso neto total descontado a cualquier año fijo de referencia, o bien una anualidad que represente el ingreso neto anual medio.

El ingreso neto total actualizado es la suma de los ingresos netos (ingresos menos costos) anuales descontados al presente, que se obtendrían de un bosque manejado de acuerdo al plan, en un determinado período de tiempo.

Esta medida de efectividad supone

que la empresa tiene acceso al mercado de capitales, pudiendo siempre obtener o ceder capital pagando u obteniendo la tasa de interés usada en la actualización (12). Representa el beneficio obtenido en el manejo de una unidad de bosque.

La tasa interna de retorno es la tasa media a la que crecería el capital de la empresa en un determinado período de tiempo, si los ingresos netos se fueran reinvirtiendo en nuevos bosques igualmente productivos. Supone que la empresa puede expandirse continuamente y que no tiene acceso al mercado de capitales (12). Desde otro punto de vista, se puede considerar como el valor de la tasa de interés que anularía el ingreso neto total actualizado. Representa el beneficio obtenido por unidad de capital en el manejo de bosques.

En el caso de un mercado de competencia perfecta, en el largo plazo la tasa externa de interés se igualaría con la tasa interna de retorno, el ingreso neto total actualizado (beneficio anormal) sería cero, y las dos medidas de efectividad que hemos visto serían equivalentes.

La aplicabilidad de una u otra de estas medidas de efectividad en un caso particular depende de los supuestos en cuanto a la movilidad de los factores de producción. Si la empresa maneja un predio (el factor tierra es fijo) y los ingresos netos obtenidos se invierten en otras actividades, con una tasa de interés determinada, sería adecuado usar como medida de efectividad el ingreso neto actualizado. En cambio, si el capital es el factor fijo, y las utilidades pueden invertirse en nuevos bosques u otras actividades que proporcionen un retorno similar, sería más correcto usar la tasa interna de retorno. Puede señalarse que el criterio de la tasa interna de retorno resulta en rotaciones más cortas que al utilizar el ingreso neto actualizado como medida de efectividad.

Criterio de alternativa óptima.-

El resultado de la aplicación de una alternativa de manejo está influenciada por factores aleatorios, no pudiendo predecirse con exactitud. La función de densidad de probabilidad de la medida de efectividad (fig.1), que indica la probabilidad de obtener cierta efectividad aplicando una alternativa determinada, se conoce como la función de efectividad de esa alternativa (30).

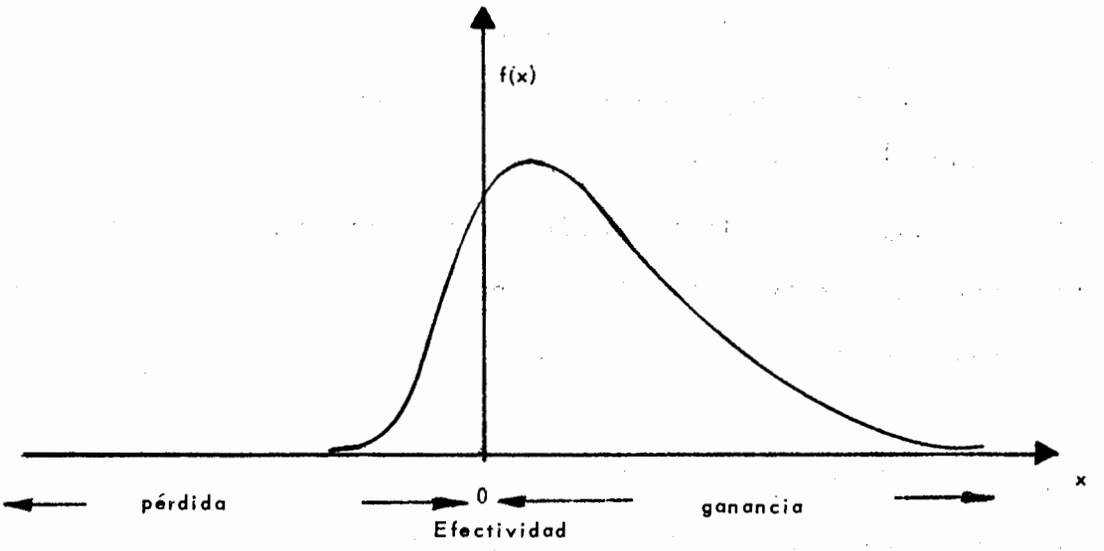


FIGURA 1

El criterio más usado es considerar óptima la alternativa que maximice el valor esperado de la efectividad, o sea la alternativa para la cual

$$\int_{-\infty}^{\infty} x\, f(x)\, dx$$

es máximo. Otros criterios usados frecuentemente son la minimización de la pérdida esperada

$$\int_{-\infty}^{0} x\, f(x)\, dx \Big/ \int_{-\infty}^{0} f(x)\, dx,$$

y la maximización de la ganancia esperada

$$\int_0^\infty x\, f(x)\, dx \Big/ \int_0^\infty f(x)\, dx .$$

Si una empresa tiene la intención de manejar un bosque durante un número apreciable de rotaciones y es capaz de soportar pérdidas ocasionales fuertes, preferirá maximizar su retorno en el largo plazo, o sea que podrá usar el criterio del máximo retorno (efectividad) esperado. Este es también el criterio más adecuado para empresas estatales.

Pero tomemos el caso de una empresa pequeña, con poco capital y que puede quebrar si incurre en pérdidas fuertes. Este empresario probablemente prefirirá usar el criterio de minimizar su pérdida esperada, o un criterio de minimizar la probabilidad de tener una pérdida mayor que cierta cantidad. El determinar cuál es el criterio adecuado en cada caso es parte del análisis de los objetivos.

La aplicación de estos criterios requiere conocer la función de efectividad, la cuál se obtiene solamente cuando se usan modelos estocásticos o probabilísticos. En manejo forestal los modelos más usados son de tipo determinístico, o sea que suponen que los resultados de una operación quedan totalmente determinados especificando la alternativa que se aplica. Estos modelos, en consecuencia, permiten estimar y maximizar solamente el valor esperado de la efectividad. *

EL PROBLEMA DE ESTUDIO.-

De lo anterior se desprende que el problema de estudio consiste en determinar, de entre las alternativas consideradas, aquella que hace máximo (o mínimo) el criterio de efectividad elegido. Para lograr esto es necesario disponer de un modelo matemático que relacione las alternativas de manejo con la función de efectividad (o con el valor esperado de la efectividad).

* Esto es falso en general (1971).

CAPITULO 2

E L M O D E L O

La formulación del problema hace explícitas las alternativas de acción a ser evaluadas y define una medida de efectividad. El paso siguiente es construir un modelo en el cual la efectividad del sistema pueda ser expresada como una función de los valores de las variables que determinan su comportamiento. Algunas de estas variables pueden ser alteradas por decisiones del ejecutivo (fecha e intensidad de raleos, distancia de plantación, etc.) mientras que otras se consideran dadas por el medio (condiciones de mercado, avances tecnológicos, etc.). Aquellas que dependen de las decisiones del ejecutivo se llaman "variables de control". Los valores de las variables de control definen las alternativas de acción.

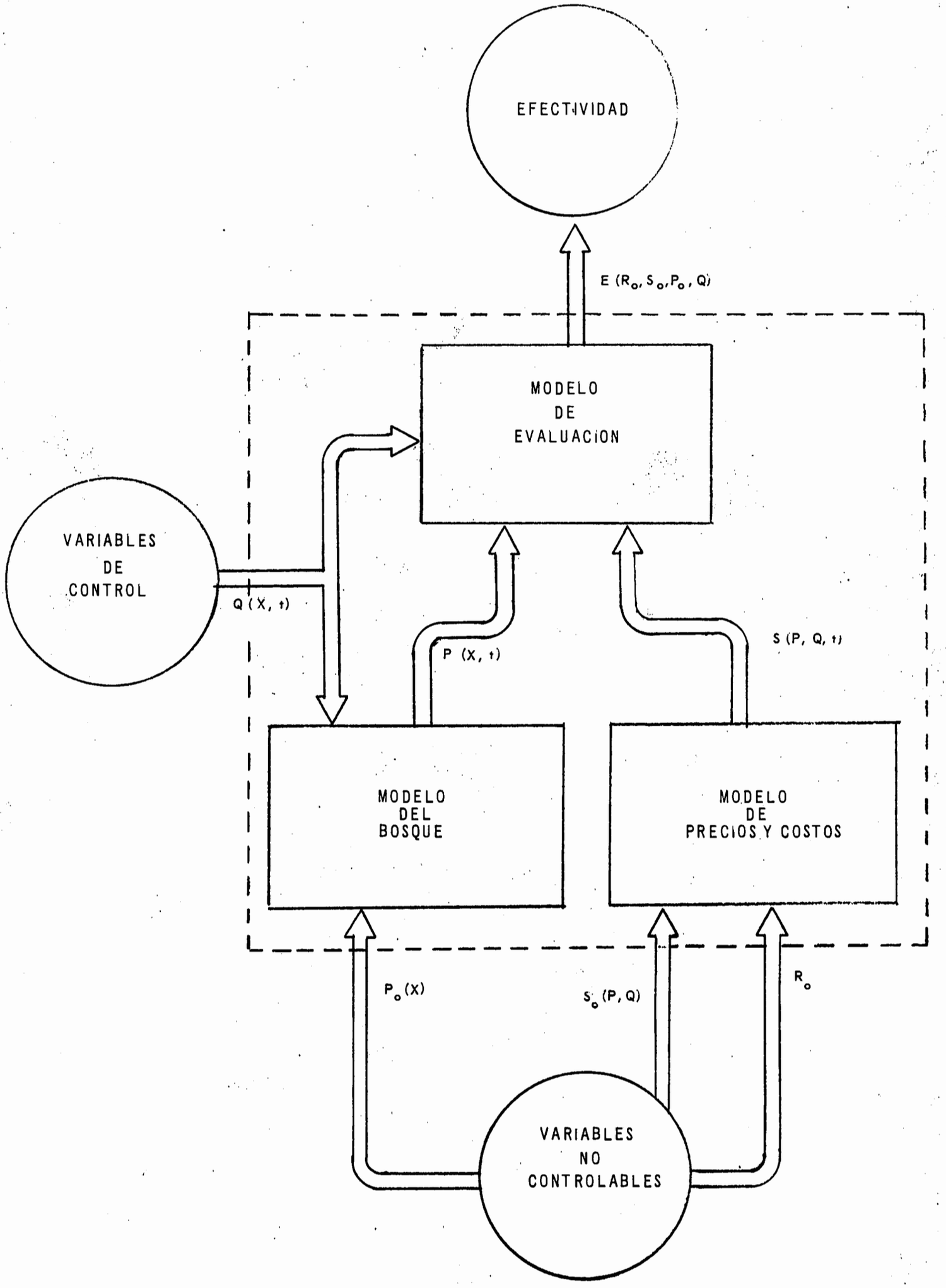
La forma general de este modelo es

$$E = f\ (x_i, y_j)\ ,$$

donde E representa la efectividad del sistema, x_i las variables de control y y_j las variables no sujetas a control. Las restricciones sobre los valores de las variables, implicadas en los objetivos o debidas a limitantes físicas, pueden expresarse en un conjunto adicional de ecuaciones y/o inecuaciones.

En nuestro caso, la construcción del modelo de nuestro sistema empresa-bosque-mercado conviene abordarla estudiando separadamente los subsistemas en que puede dividirse. Podemos así construir un modelo de evaluación, que representa los objetivos de la empresa, un modelo del bosque, y un modelo de precios y costos que representa las características del mercado que nos interesan. Estos modelos se interrelacionan en un modelo del sistema completo (Fig. 2).

El modelo de evaluación expresa la efectividad en función de los vectores P, Q y S.


EFECTIVIDAD
E (R$_o$, S$_o$, P$_o$, Q)
MODELO DE EVALUACION
VARIABLES DE CONTROL
Q (X, t)
P (X, t)
S (P, Q, t)
MODELO DEL BOSQUE
MODELO DE PRECIOS Y COSTOS
P$_o$ (X)
S$_o$ (P, Q)
R$_o$
VARIABLES NO CONTROLABLES

F I G U R A 2

P es el "vector de estado" del bosque, y sus componentes son las variables suficientes para caracterizar el bosque, en cada lugar X del predio y en cada momento t. Esta caracterización se entiende en el sentido de que dos bosques que tuvieran vectores de estado iguales se considerarían equivalentes para fines de manejo. El número de componentes del vector dependerá del grado de afinamiento que se persiga. El estado del bosque podría ser descrito, por ejemplo, por las variables altura, DAP medio y número de árboles por hectárea. En modelos más complicados podrían incluirse medidas de dispersión, número de árboles podados por clase de DAP, altura de poda, etc. El número de dimensiones del vector de estado también puede ser infinito, como en el caso de incluir en la caracterización la distribución diamétrica de los árboles.

El vector Q representa las variables de control,* en función del lugar X y del tiempo t. En el caso más simple puede ser unidimensional, teniendo como variable única el número de árboles a sacar. Más generalmente puede incluir también la distancia de plantación, variables de poda, una medida de selectividad del raleo como por ejemplo la relación entre el DAP medio de los árboles raleados y el DAP medio de los árboles que quedan (84), etc.

El vector S contiene los costos de las intervenciones y otros costos del manejo, tasa de interés y precios de los productos y beneficios obtenidos. Puede considerarse como un vector de estado del mercado. Los precios y costos serán una función del estado del bosque y del tipo de intervención, representados por P y Q, respectivamente. Tanto los precios y costos como la tasa de interés pueden variar en el tiempo.

---

* En modelos económicos, las variables de estado, de control, y no controlables, generalmente se denominan variables endógenas, instrumentales y exógenas, respectivamente (64).

El modelo de precios y costos permitiría proyectar estas cantidades al futuro. La predicción se basa en los precios y costos actuales, S_o, y en informaciones adicionales sobre estadísticas de precios, perspectivas tecnológicas, etc., representadas por el vector R.

El modelo del bosque permite predecir el desarrollo del bosque en función de su estado inicial P_o y de su manejo representado por Q.

Es necesario hacer notar que en los modelos estocásticos, el modelo proporciona las funciones de densidad de probabilidades de las variables indicadas y no solamente sus valores esperados.

El nivel actual de los conocimientos no proporciona soluciones completamente satisfactorias a los problemas de construcción de estos modelos. Sin embargo, examinaremos brevemente las soluciones disponibles y posibles caminos para la investigación futura.

MODELOS DE EVALUACION.-

Como señalamos anteriormente, el modelo de evaluación tiene por objeto evaluar los resultados del manejo en términos de la medida de efectividad elegida. En el Capítulo 1 ya discutimos las dos medidas de efectividad adecuadas, el ingreso neto total actualizado y la tasa interna de retorno.

En ambos casos es necesario, en primer lugar, determinar el ingreso neto anual. Este ingreso neto consiste en la diferencia entre el valor de los ingresos obtenidos y los gastos efectuados, en cada año, pudiendo ser positivo o negativo. Los ingresos pueden incluir tanto los beneficios directos del bosque como los indirectos. Como indicamos en el capítulo anterior, la valorización de ingresos y gastos puede hacerse a precios de mercado o a costos de oportunidad.

El valor de los beneficios está dado por

la cantidad y características de los productos y servicios, que a su vez dependen del estado P del bosque y de las características Q de las intervenciones efectuadas, y de los precios en función de las características de los productos proporcionados por el modelo de precios y costos. Los gastos dependen de los costos de las intervenciones (que son función de P y Q), los que son proporcionados también por el modelo de precios y costos.

Para obtener el ingreso neto total actualizado deben descontarse al presente todos los ingresos netos anuales. Si la tasa de interés no varía en el tiempo, la medida de efectividad será entonces

$$E = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{I_t}{(1+p)^t} , \qquad /1/$$

siendo E = efectividad

I_t = ingreso neto del año t

p = tasa de interés en valor decimal

n = período considerado para la evaluación

Si la tasa de interés es variable, es preferible trabajar con la tasa instantánea de interés i, que es igual al logaritmo natural de uno más la tasa de interés anual (12). Esta tasa se define como el incremento instantáneo del capital, por unidad de tiempo y unidad de capital:

$$i = \frac{dC}{CdT} ,$$

de modo que si la tasa de interés es función del tiempo podemos escribir:

$$\frac{dC}{C} = i(T)\, dT,$$

e integrando entre 0 y T:

$$\ln C - \ln C_0 = \int_0^t i(T)\, dT \quad ,$$

donde C_0 es el capital inicial. Luego

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left[\int_0^t i(T)\, dT\right] ,$$

y los ingresos descontados al presente son

$$E = \int_0^n \frac{I(t)}{\exp\left[\int_0^t i(T)\, dT\right]} dt \qquad /2/$$

Si el interés es constante esta expresión se reduce a

$$E = \int_0^n \frac{I(t)}{e^{it}}\, dt \ , \qquad /3/$$

que es equivalente a /1/ si los ingresos se producen en una sola fecha fija del año, como se puede comprobar reemplazando i en términos de p. En algunos casos puede facilitarse la manipulación analítica del modelo si se usa la fórmula /3/ en lugar de la fórmula /1/.

En el caso especial de que se obtengan indefinidamente ingresos períodicos iguales, como cuando se maneja indefinidamente en igual forma un rodal y los precios y costos se mantienen constantes, y se empieza con el terreno desnudo, la fórmula /1/ se transforma en la clásica fórmula de Faustmann o de valor potencial del suelo.

Si se obtienen ingresos netos anuales iguales durante un período infinito de tiempo, como cuando se maneja indefinidamente un bosque perfectamente regulado desde el momento inicial y los precios y costos no varían, la maximización de /1/ es equivalente a maximizar el valor ~~(del ingreso neto anual)~~. de la renta del bosque

La tasa interna de retorno es la tasa de interés que anularía el ingreso neto total actualizado. Por lo tanto

puede calcularse igualando a cero las fórmulas indicadas anteriormente y despejando p, que sería entonces la medida de efectividad. Esto puede conseguirse solamente en el caso de un ingreso periódico constante (12). En general no es posible despejar p, siendo necesario calcularlo numéricamente por aproximaciones sucesivas (69, 76).

Cabe señalar que en el cálculo de los valores reales del ingreso neto total actualizado y de la tasa interna de retorno deben tomarse en cuenta todos los ingresos y costos, incluyendo gastos generales y el valor del predio. Sin embargo, en el uso del ingreso neto total actualizado como medida de efectividad no es necesario considerar aquellos ingresos y costos que no son afectados por las variables de control.

MODELOS DE PRECIOS Y COSTOS.-

El problema de los precios y costos podemos dividirlo en dos partes. En primer lugar hay que expresar el ingreso neto de las intervenciones en función del vector de estado P y del vector de control Q, y en segundo lugar hay que proyectar este valor a futuro.

El ingreso neto puede calcularse de varias maneras, según las características de la empresa. Puede considerarse el precio en pie de la madera que se va a extraer (el que puede ser negativo como en el caso de raleos no comerciales), no habiendo entonces costos de extracción. O bien puede tomarse el precio de la madera puesta en aserradero o estación, e incluir en los costos los costos de explotación y transporte. Otra forma sería usar el precio de la madera aserrada y los costos de explotación, transporte y transformación.

En cualquier caso los precios y costos deben expresarse en función de las características de la intervención, definidas por el vector Q, y las características del bosque, definidas por el vector de estado P. Estas funciones pueden determinarse basándose en

los rendimientos en madera (23 ,80,87), índices de precios comerciales por tipo y dimensiones de productos (85), estudios de tiempos (4), etc.

El problema de proyectar estos valores al futuro es mucho más serio. En algunos casos se mantienen fijas las formas de las funciones de precios y costos, haciendo variar los valores en un porcentaje anual fijo (69,76). Esto es equivalente a suponer que la estructura de precios permanece constante, variando únicamente el nivel de precios en forma lineal.

En la realidad, tanto la estructura como el nivel de precios cambian en el tiempo. Posibles formas de abordar este problema sería a través de modelos del mercado (45) o por extrapolación de series cronológicas (26,70,88), aunque es discutible el efecto que tal refinamiento pudiera tener en el mejoramiento de las decisiones.

Ante las dificultades que presenta la predicción (y también la evaluación con precios y costos variables), generalmente se supone que los precios y costos se mantendrán constantes. Es probable que el error que introduce este supuesto no sea grande, ya que el efecto de los ingresos futuros en la medida de efectividad disminuye rápidamente a medida que se alejan en el tiempo. Además las decisiones del plan de manejo se aplicarán por un período limitado de tiempo, pasado el cual este plan es recalculado con nuevas informaciones.

Si se trata de construir un modelo estocástico de todo el sistema habría que estimar no sólo el valor esperado de los ingresos netos, sino también la varianza de la estimación en función del tiempo.

MODELOS DEL BOSQUE.-

Regulación del bosque.

El principio del rendimiento sostenido ha sido tradicionalmente aceptado y mantenido como un principio básico del

manejo. Así por ejemplo, K.P. Davis (32) afirma: " La organización de una propiedad forestal para proveer un flujo sostenido de productos es el corazón del manejo forestal ". Entre los fundamentos de una buena empresa forestal incluye "una corta anual de aproximadamente igual volumen ".

Basándose en la regulación del bosque como un objetivo del manejo, se ha desarrollado una gran cantidad de fórmulas y procedimientos para llevar el bosque a un estado de rendimiento sostenido (27, 29, 32, 36, 58, 74).

Sin embargo, de acuerdo a Nautiyal y Pearse (61): " El concepto de cosechas sostenidas anuales o periódicas iguales de madera no está basado en criterios económicos rigurosos ni, como D. Haley ha demostrado recientemente, es probable que tal regimen de manejo maximice el valor económico de un bosque".

Veamos cuáles podrían ser las ventajas del rendimiento sostenido para una empresa cuyos objetivos son el beneficio económico. Si esta empresa debe abastecer una planta de su propiedad, es evidente que las fluctuaciones grandes en la producción de un bosque no regulado la llevará en algunos períodos a abastecer la planta con madera proveniente de otras fuentes, con un mayor costo. En otros períodos tendrá excedentes de madera que deberá venderse obteniendo una menor utilidad.

La optimización en este caso podría intentarse por dos caminos diferentes. Una forma de abordar el problema sería tratar de construir un modelo conjunto para el sistema bosque-planta. El otro camino sería asignarle a la madera producida por la empresa y consumida por la planta un precio igual al de la madera proveniente de otras fuentes de abastecimiento. De este modo, al sobrepasarse las necesidades de la planta, el excedente debe venderse a menor precio de manera que el precio medio de la madera producida disminuye. Si se preveen estas fluc-

tuaciones de precios en el modelo de precios y costos, la optimización del modelo llevaría a la regulación del bosque en la forma más beneficiosa para la empresa. Debe observarse que las fluctuaciones de precios en este caso dependerían del programa de regulación y viceversa, de modo que los modelos del bosque y de costos y precios ya no serán independientes y habría que integrarlos en uno solo.

Un problema similar se presenta si los costos fijos de explotación y raleos dependen del volumen explotado anualmente. Esto puede suceder si es posible cambiar los equipos y métodos usados de acuerdo al volumen que se explote. Aquí se presenta el agravante de que los costos dependerán no solo del volumen explotado sino también de la importancia y duración de sus fluctuaciones, debido a que la movilidad de las inversiones y mano de obra no es perfecta.

Puede apreciarse que la construcción y optimización de un modelo que considere estos factores es extremadamente compleja, y al parecer no existen estudios al respecto. Sin embargo, es probable que estos factores no influyan de manera importante en la efectividad de la operación y no se justifique afinar demasiado en este punto. En el hecho, generalmente un predio forestal contiene rodales de distintas edades, disminuyendo así las fluctuaciones en la producción. Además la explotación puede enfrentarse en forma cooperativa o en base a contratistas, y es improbable que una planta grande se abastezca de un área que contenga exclusivamente rodales de una sola edad y rotación económica.

Lo importante es que, como lo señala Buttrick (22), " el rendimiento sostenido debe existir en una base regional. La región debe ser una unidad económica en la cual la producción y el consumo se equilibren hasta el punto en que exista un flujo continuo y uniforme de materia prima para abastecer plantas locales y mante-

ner ocupada la mano de obra local." Esta región se entiende como el área de abastecimiento económico de las plantas que se encuentran en ella. Una región así considerada contendrá generalmente rodales de diversas edades y en diferentes clases de sitio, siendo así la producción suficientemente regular. Además podría demostrarse que si el manejo es racional, con control frecuente de las condiciones de mercado, se tenderá al manejo sostenido a nivel regional porque las rotaciones se ajustarán hacia una regularización de la oferta.

De acuerdo a lo anterior, en la mayoría de los casos el manejo óptimo del predio se conseguirá (o se aproximará mucho) con la optimización del manejo de cada rodal separadamente, sin intentar la regulación del bosque. En el modelo general (Fig. 2) reemplazaríamos entonces el modelo del bosque por un modelo de rodal, y desaparecería el vector de ubicación X.

Si se insiste en la necesidad de llevar el bosque a un estado de rendimiento sostenido dentro de un plazo determinado, el modelo más adecuado disponible es el propuesto por Nautiyal y Pearse (61). Este modelo acepta desde la partida la meta del rendimiento sostenido como una restricción en el régimen óptimo de manejo. Permite calcular el programa óptimo de cortas finales para alcanzar el rendimiento sostenido en un plazo dado. Comparando la efectividad de la operación con esta restricción y sin ella se puede juzgar, a la luz de los objetivos que abogan por el rendimiento sostenido y que no se incluyen en la medida de efectividad, si es conveniente regular el bosque en ese plazo. No se contempla la optimización de raleos u otras intervenciones. Los autores hacen notar que la característica más problemática del modelo, desde el punto de vista práctico, es el gran número de restricciones y variables, lo que exige el uso de un computador de gran capacidad para la optimización. Además el programa se haría mucho más complejo si se introdujeran varias clases de sitio.

Aunque no lo discutiremos aquí, se podría obviar en gran parte el problema computacional reformulando y optimizando el modelo por la técnica de programación dinámica en lugar de la programación lineal usada por Nautiyal y Pearse.

Es importante hacer notar que el modelo de Nautiyal y Pearse supone los precios y costos constantes. Estudios de simulación (43) indican que con precios variables se obtiene una utilidad bastante mayor adaptando las cortas a las condiciones de mercado, y en este caso el bosque no alcanza nunca un estado de rendimiento sostenido.

Modelos de rodal.-

Ya sea que se trate de optimizar el manejo de un rodal o el manejo del bosque completo, es necesario contar con un modelo que permita predecir el desarrollo de un rodal sometido a un manejo dado. En el segundo caso, el modelo de rodal constituiría una parte del modelo del bosque.

- Modelos determinísticos.- Examinemos el comportamiento del rodal, en un ambiente dado, como un sistema físico determinístico (5,9). El estado del rodal en un momento dado t está descrito por el vector P_t. Al transcurrir un año, el rodal habrá pasado a un estado P_{t+1} y este nuevo estado dependerá del estado que tenía en el año t y de las intervenciones realizadas el año t, o sea

$$P_{t+1} = f(P_t, Q_t) , \qquad t = 0,1,2,\ldots \qquad /4/$$

El estado al final del año n estará dado entonces por

$$P_{n+1} = f(f(\ldots f(f(P_0,Q_0), Q_1)\ldots, Q_{n-1}), Q_n), \qquad /5/$$

donde P_0 es el estado inicial del rodal y el conjunto de vectores de control $\{Q_t\}$ define el plan de manejo aplicado. Concluímos de esto que lo único que necesitamos para conocer la evolución del rodal sometido a un plan de manejo dado, es su estado inicial y la forma de la función /4/.

En la práctica nos interesa conocer solamente la evolución del rodal entre dos intervenciones sucesivas, ya que el efecto de las intervenciones equivale simplemente a cambios de estado que se pueden aceptar como instantáneos. El desarrollo del rodal, descrito por el conjunto de vectores de estado $\{P_t\}$, se podrá obtener entonces cocociendo el estado inicial P_0, el plan de manejo $\{Q_t\}$ y la función

$$P_{t+1} = f(P_t).$$

Esta ecuación puede también escribirse en la forma

$$P_{t+1} = P_t + g(P_t), \quad ó \quad \Delta P = g(P), \qquad /6/$$
$$t = 0,1,2....,$$

representando $g(P)$ el incremento anual del vector de estado.

La representación vectorial se ha usado sólo para explicar más concisamente los conceptos. En la aplicación se trabaja directamente con las variables escalares. Así, la ecuación vectorial /6/ corresponde al sistema de ecuaciones escalares.

$$\begin{aligned}
\Delta p_1 &= g_1(p_1, p_2 \ldots\ldots, p_m) \\
\Delta p_2 &= g_2(p_1, p_2, \ldots\ldots, p_m) \\
&\vdots \\
\Delta p_m &= g_m(p_1, p_2, \ldots\ldots, p_m)
\end{aligned}$$

donde $p_1, p_2, \ldots, p_m$ son los valores de las m variables de estado.

La formulación del modelo en ecuaciones en diferencias finitas que se ha explicado, es adecuada para la computación numérica, ya sea manual o en computadores digitales. En cambio, para la manipulación analítica o en computadores análogos es preferible tratar el desarrollo del rodal como un proceso continuo. En este caso, la ecuación /6/ es equivalente a

$$\frac{dP}{dt} = h\ (P), \qquad /7/$$

donde ahora h(P) es el incremento instantáneo, por unidad de tiempo, del vector de estado. Los dos tipos de modelos son equivalentes para valores enteros de t.

El estado del rodal, para un intervalo entre intervenciones, puede obtenerse en función del estado inicial y del tiempo resolviendo las ecuaciones /6/ o /7/. Estas ecuaciones podrán resolverse analíticamente sólo en el caso de modelos muy simples. En general la solución sólo podrá obtenerse numéricamente o por simulación análoga.

Los modelos que más se han usado en el manejo son las tablas de rendimiento. Estas tablas dan una variable de estado, generalmente el volumen, en función del tiempo para un rodal de densidad "normal" (tablas normales de rendimiento) o para un rodal sometido a un plan de manejo determinado (tablas empíricas de rendimiento). Para predecir el crecimiento en condiciones diferentes a aquellas para las que se construyó la tabla, se supone que pasado cierto tiempo luego de un raleo el rodal vuelve a la densidad normal, creciendo en volumen como si no hubiera sido raleado. Sólo puede predecirse entonces el estado del rodal varios años después del raleo (23). Se ha tratado también de estimar el efecto de estas desviaciones de la normalidad con diversos métodos (18,20,32,38,48,57).

Algunos autores han usados modelos del tipo /6/ (31,55,84), y Curtis (28) desarrolló un modelo del tipo /7/. Incluyen, sin embargo, la edad entre las variables de estado *. Todos estos modelos se basan en regresiones empíricas entre cierto número de variables.

---

* Los sistemas de este tipo en los cuales aparece explícitamente la variable independiente t en el segundo miembro de las ecuaciones se conocen como no autónomos, mientras que los que hemos propuesto son sistemas autónomos de ecuaciones diferenciales o en diferencias (71).

Los modelos empíricos tienen el inconveniente de que es posible que las ecuaciones no se ajusten adecuadamente a la realidad, ya que sólo puede probare un número limitado de formas funcionales. Además las regresiones obtenidas no tienen significado físico, siendo válidas para estimar el desarrollo de una especie determinada dentro del rango de las variables para el cual se dispone de datos, pero no permiten prever el comportamiento del rodal en otras condiciones. Por otra parte, la construcción de un modelo empírico requiere de un gran volumen de datos, recopilados a través de un tiempo largo y abarcando un rango amplio de las variables, los cuales son difíciles o imposibles de obtener en países de poca experiencia forestal como es el caso de Chile.

Se hace necesario entonces investigar los aspectos teóricos del desarrollo de un rodal, con el fin de llegar a conocer la forma aproximada que deberían presentar las ecuaciones del modelo. Teniendo la forma de estas ecuaciones se necesitaría un número relativamente reducido de datos para estimar los valores de sus coeficientes.

En el Apéndice se describe un ejemplo de modelo simple, basado en varios supuestos y consideraciones teóricas, conteniendo como variables de estado la altura, volumen y número de árboles por hectárea.

Cuando se hacen raleos de regular intendidad son importantes como variables de estado las características de las copas. Los diámetros de copa indican el grado de competencia entre los árboles (52,53,78,83). Además las dimensiones de la copa son importantes en la determinación de la forma del fuste (34,35,39,54,75). Es muy posible que luego de un raleo los árboles destinen una mayor proporción de los carbohidratos sintetizados al crecimiento del fuste, a expensas del desarrollo de la copa. Esto explicaría el fuerte incremento de volumen (del fuste)

que se produce inmediatamente después de un raleo fuerte y que ha sido atribuído por algunos autores a un fenómeno de estimulación desconocido (33,59). Por otra parte, la profundidad de copa afecta a la cantidad, calidad y tamaño de los nudos. Todo esto indica la importancia que tienen las mediciones de copas y su consideración en la construcción de modelos de rodal.

Otro factor importante en el desarrollo de un rodal es la variabilidad de las dimensiones entre los árboles que lo componen. Esta variabilidad debe afectar la tasa de mortalidad natural y las relaciones de dominancia (53). Una gran uniformidad genética y de micrositios podría explicar los casos de los "rodales estagnados", mencionados frecuentemente (17,33), que son rodales que han crecido normalmente al principio pero luego han alcanzado una densidad muy alta, fallando la diferenciación en clases de copa y deteniéndose el crecimiento casi por completo. Estos efectos de la variabilidad en el desarrollo del rodal podría tener implicancias en los programas de mejoramiento genético de las especies forestales.

La relación entre los factores citados y el desarrollo del rodal es muy compleja. La única forma de ir perfeccionando los modelos de rodal del tipo indicado es a través de un estudio más detallado del desarrollo de los árboles individuales en relación con sus vecinos. Esto implica la elaboración de modelos que representen la evolución de un árbol en función de su estado y del estado del resto de los árboles que componen el rodal. El objetivo sería obtener, a partir de este modelo, un modelo para la evolución de la función de distribución de las variables de estado de los árboles individuales en el rodal.

Los modelos del árbol individual se basarían en su fisiología. Modelos de este tipo han sido aplicados con éxito en la predicción del crecimiento en animales y peces (2,13,14,15,16,19,65). En el campo forestal se han dado también algunos pasos en este sentido (62,63,67,86).

En el caso de los animales y peces generalmente se pueden despreciar las interacciones entre los individuos. En un rodal, sin embargo, las relaciones de competencia entre los árboles son de primordial importancia. Esto, agregado al hecho de que para describir adecuadamente un árbol necesitamos un mayor número de variables de estado que para los animales o peces (en los cuales generalmente son poco importantes los cambios de forma, bastando el peso o longitud para describir su estado), hace que los modelos forestales de este tipo presenten muchas más dificultades.

La obtención analítica de un modelo del rodal teniendo el modelo de los árboles individuales no parece ser trivial. Se han usado métodos de simulación para estudiar el comportamiento de un rodal en base a modelos simples de los árboles individuales y sus interacciones (62,63,79).

Estos modelos basados en árboles individuales es improbable que vayan a ser de aplicación directa al manejo de las plantaciones en el futuro inmediato. La utilidad principal de estudiarlos estriba en que esta investigación permitiría una mejor comprensión del desarrollo de un rodal y un perfeccionamiento de los modelos más simples. No obstante, en el manejo de bosques disetáneos y mixtos parecen ser la única posibilidad de predecir adecuadamente el efecto de las intervenciones silvícolas.

Podemos mencionar aún un tipo de modelo más detallado que los dos anteriores. Si, de acuerdo al nivel de detalle, llamamos modelos de nivel 1 a aquellos que describen la evolución de características globales del rodal y modelos de nivel 2 a los que describen la evolución de la distribución de características de los árboles que componen el rodal, se puede llamar modelos de nivel 3 a los que describen la evolución de la distribución de características de las partes que componen los árboles. Los modelos de nivel 3 tratan de relacionar principalmente la forma y distribución de densidad del fuste con las dimensiones de la copa

y las condiciones ambientales.

La mayoría de los modelos que tratán de explicar la forma del fuste (21,34,35,54,75) se basan en lo que Rashevsky (68) ha llamado "principio de diseño óptimo" y que formula así: "Para un conjunto de funciones biológicas determinadas y de intensidad determinada un organismo tiene el diseño óptimo posible en relación a economía de material usado y de gasto de energía necesaria para el cumplimiento de tales funciones". Estos modelos consideran generalmente sólo la función de soporte que cumple el fuste. Otra forma, probablemente más promisoria, de abordar el problema es a través de la formulación de hipótesis basadas en la organización del crecimiento cambial y apical del árbol, fundamentadas con datos de análisis de tallo (39,40). Aunque los conocimientos actuales no permiten la construcción de modelos de rodal a este nivel, estas investigaciones son fundamentales para una mejor comprensión de los factores que afectan la calidad de la madera (a través de la distribución de densidad y de la cantidad y tamaño de los nudos) y el rendimiento en madera aserrada (determinado por la forma del fuste).

- Modelos estocásticos.- Hemos visto que en un modelo deterministico suponíamos que el estado del rodal en un momento cualquiera quedaba completamente determinado conociendo el estado en un momento anterior y las intervenciones efectuadas entre los dos momentos. En realidad, sin embargo, al construir un modelo siempre se hacen ciertas idealizaciones, siendo imposible incluir todas las variables que influyen sobre el sistema. El efecto de las variables omitidas (incluyendo condiciones climáticas) muchas veces puede considerarse como aleatorio, recibiendo el nombre de "ruido " (5). En lugar de las ecuaciones /6/ y /7/ tendremos entonces

$$P_{t+1} = P_t + g(P_t) + U_t \ ,$$

y

$$\frac{dP}{dt} = h(P) + V(t),$$

donde U_t y $V(t)$ son vectores aleatorios de valor esperado cero y distribución que puede depender del estado del rodal.

De esta manera el estado del rodal en un momento dado t será una variable vectorial aleatoria o estocástica P_t. El proceso de desarrollo del rodal quedará entonces definido por la familia de variables aleatorias $\{P_t, t \in T\}$, constituyendo lo que se llama un proceso estocástico (26,36,66,81). Si T es una secuencia finita, o ~~denumerablemente~~ infinita numerable (si se considera el desarrollo del rodal como un proceso discreto en el tiempo, como en las ecuaciones /6/), $\{P_t\}$ es llamado un proceso estocástico con paramétro discreto o una secuencia esctocástica (81). Si T es un intervalo finito o infinito (como en el caso de considerar el desarrollo del rodal como un proceso continuo, ecuación /7/), $\{P_t\}$ es llamado un proceso estocástico con parámetro continuo o, brevemente, un proceso estocástico.

Más específicamente, el desarrollo de un rodal puede considerarse como un proceso o una cadena de Markov homogéneos. Los procesos (cadenas) de Markov son procesos (secuencias) estocásticos en los cuales el conocimiento del estado actual determina unívocamente su comportamiento estocástico futuro, y este comportamiento no depende del pasado del proceso.

La teoría y aplicación de las cadenas de Markov con espacio de estado continuo (llamadas por otros autores procesos de Markov en tiempo discreto) está menos desarrollada que la de los procesos de Markov en tiempo continuo (26,pág. 133-135). Veamos brevemente algunas características de los procesos de este último tipo, cuando la variable aleatoria es un vector (26).

Interesa conocer la distribución de probabilidad de un estado en un momento determinado, conociendo el estado inicial del rodal. Sea $f(X_o,t_o;X,t)$ la función de densidad de probabilidad de $P(t)$ (como función de su valor X) condicional a $P(t_o) = X_o$. Esta función se conoce como densidad de probabilidades de transición.

El incremento medio instantáneo e ~~indefini-~~ infini-tesimal por unidad de tiempo del componente i del vector de estado, que corresponde a $dp_i/dt = h_i(P)$ en el caso determinístico (ecuación /7/), se define como

$$m_i(X,t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} E\left[\left\{x_i(t+\Delta t) - x_i(t)\right\} \middle| P(t) = X\right]$$

$$(i = 1,2,\ldots,n),$$

donde el operador E indica el valor esperado.

Los segundos momentos infinitesimales se definen por

$$\sigma^2_{ij}(X,t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} C\left[\left\{x_i(t+\Delta t) - x_j(t)\right\} \middle| P(t) = X\right]$$

$$(i,j = 1,2,\ldots,n),$$

donde el operador C indica la covarianza.

La densidad de probabilidades de transición $f(X_o,t_o;X,t)$ puede obtenerse entonces de la forma para variables multidimensionales de la ecuación hacia adelante de Kolmogorov o ecuación de difusión de Fokker-Planck:

$$\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j}\left\{\sigma^2_{ij}(X,t)f\right\} - \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{m_j(X,t)f\right\} = \frac{\partial f}{\partial t} \qquad /8/$$

En nuestro caso se trata de un proceso homogéneo en el tiempo, o sea que el comportamiento del rodal no depende del valor de t, de modo que podemos escribir el incremento medio y los segundos momentos simplemente como $m_i(X)$ y $\sigma^2_{ij}(X)$, respectivamente.

Estos conceptos pueden extenderse, al menos en principio, a los modelos de nivel 2 y 3.

Aparentemente la única aplicación publicada de la teoría de procesos estocásticos en la construcción de modelos de rodal es el

modelo propuesto por Hool (46). Se trata de una cadena de Markov unidimensional en espacio de estados discreto. Puede considerarse en cierto modo como un modelo de nivel 2, ya que describe el rodal por la distribución de los árboles por clases de DAP, aunque no toma en cuenta las relaciones de competencia entre los individuos. La matriz de probabilidades de transición para el modelo se estimaría en base a datos de inventario continuo.

CAPITULO 3

O P T I M I Z A C I O N

Disponiendo del modelo que relaciona la efectividad con las variables de control, se puede intentar entonces la optimización del manejo.

Una forma obvia de buscar las mejores alternativas de manejo consiste en calcular la efectividad para distintas combinaciones de las variables de control y elegir la mejor de acuerdo al criterio de efectividad adoptado. Esta predicción de los resultados de aplicar una alternativa de acción, sin efectuar la experiencia en el sistema real, se conoce como simulación, usando este término en su sentido más amplio.

Es evidente que, existiendo infinitas alternativas de manejo, es imposible examinarlas todas. Aunque existen algunas técnicas de simulación que permiten acercarse al óptimo, generalmente la simulación se usa para evaluar un número límitado de alternativas con el objeto de llegar a una solución satisfactoria, aunque no óptima.

La alternativa que optimiza la efectividad (en el modelo, no necesariamente en el caso real) puede determinarse frecuentemente por medio de diversas técnicas de optimización. En nuestro caso la técnica de optimización más adecuada disponible es la programación dinámica.

SIMULACION.-

Muchas veces la complejidad de las interacciones entre los componentes del sistema que se considera hace extremadamente difícil una formulación matemática del comportamiento del conjunto. O bien, aunque se disponga de un modelo analítico, pueden no existir técnicas de optimización para obtener la solución del problema. En tales casos se hace necesario recurrir a la simulación.

Aunque se determine la alternativa óptima median-

te técnicas de optimización, puede ser conveniente a veces simular el comportamiento del sistema. La simulación puede ser útil para adquirir una mejor comprensión del problema observando los resultados de aplicar diversas alternativas (43). Se puede por ejemplo, simular el desarrollo del rodal para distintos planes de manejo y para el plan óptimo calculado, comparándolos desde distintos puntos de vista y comprobando si el criterio de efectividad adoptado es adecuado. La simulación puede servir también para la verificación de modelos analíticos aproximados. Tal vez el uso más importante de la simulación sea el examen del problema para eliminar los factores que tengan poca influencia y facilitar así el tratamiento analítico posterior (70).

Si se dispone de un modelo matemático del bosque, las ecuaciones que lo constituyen pueden resolverse analítica o numéricamente, obteniendose la secuencia de estados que representan el desarrollo del bosque con un plan de manejo dado. Aunque esta descripción del comportamiento del sistema es una simulación en el sentido de que duplica su esencia sin efectuar la experiencia en la realidad, generalmente una solución analítica no se considera como una simulación, en sentido restringido (60). La solución analítica de las ecuaciones sólo puede conseguirse con modelos muy simples. En la generalidad de los casos es necesario recurrir a diversos métodos numéricos para resolverlas (11,44,72).

Desde hace bastante tiempo se ha usado, especialmente en ingeniería, la simulación con dispositivos análogos. Estos consisten en aparatos mecánicos, eléctricos, hidráulicos o de otro tipo, que son gobernados, al menos aproximadamente, por el mismo conjunto de ecuaciones que el sistema que interesa simular (42). Son especialmente apropiados para la simulación de sistemas representados por sistemas de ecuaciones diferenciales, y reciben el nombre de computadores análogos, simuladores o analizadores diferenciales. Los más usados actualmente consisten en circuitos electrónicos que pueden conectarse de distintas maneras de acuerdo al sistema que se desea si-

mular. Usan el tiempo como variable independiente y las variables dependientes se representan por voltajes medidos en diversos puntos del circuito.

La simulación análoga puede ser muy útil para modelos de rodal consistentes en sistemas de ecuaciones diferenciales (ver Apéndice). Al ser posible observar directamente el efecto de variar diversos parámetros de las ecuaciones, se puede estudiar la importancia de distintos factores en el desarrollo del rodal.

La simulación digital tiene una importancia fundamental en el estudio de sistemas complejos. A diferencia de la simulación análoga, en la cual se trabaja con magnitudes físicas continuas, en la simulación digital se trabaja con cantidades numéricas discretas. Cuando no es posible obtener un modelo matemático del comportamiento del sistema, éste puede dividirse en subcomponentes para los que se dispone de "submodelos" (60). A través de la simulación del comportamiento de los subcomponentes y el conocimiento de sus interrelaciones puede simularse el comportamiento del sistema. En este modelo de simulación intervienen operaciones lógicas además de las operaciones aritméticas (41).

En el campo forestal la simulación digital se ha usado con modelos de rodal de nivel 2, simulando el desarrollo de un grupo de árboles en base a los árboles individuales considerados como subcomponentes (62,63,79). Gould y O'Regan (43) han tomado unidades de terreno como subcomponentes en la simulación de planes de regulación de bosques.

En algunos casos es deseable obtener información acerca de la distribución de probabilidad de los resultados o de los estados del sistema y no solamente valores promedios. Este comportamiento estocástico del proceso puede simularse usando los métodos de Monte Carlo (41,47,60, 73). En estos métodos se introducen en el modelo de simulación valores aleatorios que se eligen al azar de acuerdo a distribuciónes de probabilidad determinadas. De esta manera, los resultados de cada simulación serán diferentes. Repitiendo cierto número de veces la simulación se obtiene una estimación de la distri-

bución de probabilidad de los resultados.

PROGRAMACION DINAMICA.-

El manejo forestal se basa en una serie de decisiones consecutivas acerca de las intervenciones a realizar en el bosque. Constituye lo que se conoce como un proceso de decisión de etapas múltiples.

La programación dinámica es una técnica matemática de optimización secuencial desarrollada especialmente para el estudio de este tipo de procesos (5,6,8,9,27,51,73). Expondremos los conceptos que implica esta técnica tomando como ejemplo un modelo de un bosque, determinístico y discreto en el tiempo, y usando como medida de efectividad el ingreso neto total actualizado.

Supongamos que en un instante inicial $t = 0$, nuestro bosque está en el estado P_o. Al transcurrir un año habrán sucedido dos cosas:

a) El bosque habrá pasado del estado P_o al estado $P_1=f(P_o,Q_o)$, donde Q_o describe las intervenciones realizadas en el momento inicial (véase la ecuación /4/ del capítulo 2).

b) Se habrá obtenido un ingreso neto $I_o(P_o,Q_o)$.

A los dos años el bosque estará en el estado $P_2=f(P_1,Q_1)$ y el ingreso neto total actualizado correspondiente a los dos años será

$$R_2= I_o(P_o,Q_o) + \frac{I_1(P_1,Q_1)}{1+p} .$$

En lo que sigue, por brevedad, llamaremos retorno al ingreso neto total actualizado.

Consideremos ahora el caso general del desarrollo del bosque a través de n años. El bosque pasará por la secuencia de estados

$$P_1 = f(P_o, Q_o)$$

$$P_2 = f(P_1, Q_1)$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$P_n = f(P_{n-1}, Q_{n-1}),$$

y el retorno correspondiente será

$$R_n = I(P_o, Q_o) + \frac{I_1(P_1, Q_1)}{1+p} + \ldots\ldots\ldots + \frac{I_{n-1}(P_{n-1}, Q_{n-1})}{(1+p)^{n-1}}.$$

Nuestro problema consiste en encontrar el conjunto admisible $\{Q_o\ Q_1 \ldots . Q_{n-1}\}$ que maximiza R_n.

Aparentemente, el problema podría ser resuelto por los métodos del Cálculo. Se presentan sin embargo varias dificultades. En primer lugar, resultaría un sistema de n ecuaciones en n incógnitas, que sería practicamente imposible de resolver si n es moderadamente grande. Además el Cálculo pued no ser aplicable debido a que las funciones implicadas no sean diferenciables. Por otro lado, existen restricciones sobre los valores de Q_t (no pueden por ejemplo cortarse más árboles de los que existen en el bosque en ese momento ni pueden cortarse cantidades negativas), lo que hace inútil el Cálculo si los valores óptimos caen en los límites del rango admisible de estos valores.

Los valores óptimos de Q pueden obtenerse numéricamente con los métodos de la programación dinámica. Obsérvese que el retorno máximo que se puede obtener depende solamente del estado inicial del bosque, P_o, y del número de años considerados, n. Representemos estos retornos máximos obtenibles para cada P_o y n por las funciones

$$F_n(P_o) = \underset{\{Q_t\}}{\text{máx}} [R_n].$$

Puede observarse ahora que si en nuestro proceso de decisión de n etapas que comienza en el estado P_o, elegimos las caracterís-

ticas de la primera intervención, Q_o, las $n-1$ etapas restantes constituyen en sí mismas un proceso de decisión de $n-1$ etapas, partiendo desde el nuevo estado $f(P_o,Q_o)$. En general, si consideramos el proceso de decisión de $k=n-t$ etapas que parte del estado P_t, si decidimos el valor de Q_t las restantes $k-1$ etapas del proceso constituyen un proceso de decisión de $k-1$ etapas partiendo del estado $f(P_t,Q_t)$.

Supongamos que en los últimos $k-1$ años del período n aplicamos un manejo óptimo, obteniendo el máximo retorno posible $F_{k-1}(P_{t+1})$. Entonces el retorno correspondiente a los últimos k años será

$$R_k = \frac{I_t(P_t,Q_t)}{(1+p)^t} + F_{k-1}(P_{t+1}),$$

o sea:

$$R_k = \frac{I_t(P_t,Q_t)}{(1+p)^t} + F_{k-1}\left[f(P_t,Q_t)\right] .$$

Eligiendo la intervención Q_t que maximiza este retorno se obtiene la relación de recurrencia,

$$F_k(P_t) = \max_{Q_t}\left\{\frac{I_t(P_t,Q_t)}{(1+p)^t} + F_{k-1}\left[f(P_t,Q_t)\right]\right\}, \qquad /9/$$

para $k = 2,3,\ldots,n$, con

$$F_1(P_{n-1}) = \max_{Q_{n-1}}\left[\frac{I_{n-1}(P_{n-1},Q_{n-1})}{(1+p)^{n-1}}\right] . \qquad /10/$$

Lo anterior es una aplicación del "principio de optimalidad" de Bellman: "Una política óptima tiene la propiedad de que cualesquiera que sean el estado inicial y la decisión inicial, las decisiones restantes deben constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la primera decisión" (6).

Empezando con la ecuación /10/ y aplicando iterativamente la ecuación /9/ puede determinarse el conjunto de vectores Q que re-

presenta el manejo óptimo del bosque para un período de n años. La maximización se hace sobre los valores admisibles de Q, los que en general estarán limitados por el estado P del bosque.

Generalmente interesa maximizar el retorno obtenido manejando indefinidamente el bosque. Se puede ver que si hacemos tender n a infinito, el valor de k en la ecuación /9/ tiende también a infinito, y por lo tanto F_k y F_{k-1} tienden a un mismo límite F. Resulta entonces la ecuación funcional

$$F(P_t) = \max_{Q_t} \left\{ \frac{I_t(P_t,Q_t)}{(1+p)^t} + F\left[f(P_t,Q_t)\right] \right\} . \qquad /11/$$

Existen métodos de aproximaciones sucesivas que permiten resolver esta ecuación y obtener la secuencia de vectores Q que representa el plan óptimo de manejo (6,8,51).

Los conceptos expuestos pueden extenderse para optimizar modelos en tiempo continuo y modelos estocásticos (6,8,51). Para optimizar la tasa interna de retorno en lugar del ingreso neto total actualizado habría que proceder por tanteo. Se repetiría el cálculo usando distintas tasas de interés hasta encontrar aquella que haga nulo el ingreso neto total actualizado máximo.

En el campo forestal, Hool (46) ha usado la programación dinámica con un modelo estocástico de rodal. Segovia et alii. (77), en Chile, han propuesto también la programación dinámica para optimizar el manejo de las plantaciones de pino insigne. Bellman y Dreyfus citan una aplicación forestal de esta técnica (3).

CAPITULO 4

IMPLEMENTACION Y CONTROL

Para hacer operativo el modelo de decisión, es necesario darle valores numéricos a sus parámetros, traducir la solución en un procedimiento de acción detallado para su aplicación práctica y determinar los procedimientos más adecuados de control y revisión periódica del modelo.

IMPLEMENTACION.-

Para aplicar el modelo se debe, en primer lugar, estimar los valores de los parámetros que aparecen en las ecuaciones.

Los parámetros del modelo de precios y costos generalmente se pueden estimar en gran parte en base a datos registrados en los archivos de contabilidad de la empresa. Para establecer algunas relaciones puede ser necesario efectuar estudios de tiempos en distintas faenas, o usar resultados publicados de estudios realizados en otros lugares, en condiciones similares.

Los parámetros del modelo de rodal pueden estimarse con datos de parcelas permanentes y/o parcelas temporales en las cuales se hayan medido incrementos.

En los modelos en tiempo discreto los valores de los parámetros pueden ajustarse por el método de los cuadrados mínimos. Si se usan parcelas temporales éstas deberían estar distribuídas en varios años para tomar en cuenta las variaciones de las condiciones climáticas. Al utilizar datos de parcelas permanentes para el ajuste por cuadrados mínimos de los parámetros del modelo, se produce un sesgo en las estimaciones debido a la interdependencia de los errores en las series cronológicas (50, pág. 212). Estos sesgos disminuyen con el tamaño de la muestra y pueden ser aceptables si se usa un cierto número de series cronológicas de distintos rodales.

El problema de la estimación de los parámetros de los modelos en tiempo continuo es más difícil, no existiendo métodos generales establecidos para este objeto (82,pág. 277). Este tipo de modelos probablemente es el que describe más adecuadamente la dinámica del bosque, lo que hace deseable la investigación de métodos para la estimación de los parámetros. *

Es importante también, de acuerdo con el ejecutivo, fijar la medida y criterio de efectividad más adecuados.

Al tratarse de modelos de cierta complejidad, se hace conveniente la programación del modelo de decisión para la ejecución de los cálculos en un computador electrónico. Esto permitiría reducir en gran parte el trabajo de oficina, reduciéndose los costos casi exclusivamente a los de obtención de los datos básicos. Esta reducción del costo de los planes de manejo, unida a los mejores resultados que pueden esperarse al hacerse posible el uso de modelos de decisión más completos, implicaría la generalización del uso de planes de manejo y su revisión y reactualización más frecuentes.

Por último, no puede considerarse completa la implementación del modelo de decisión sin asegurar la aplicación del plan en la práctica. Es necesario traducir el plan de manejo en acciones concretas, confeccionando un calendario detallado de actividades y redactando instrucciones precisas para los encargados de la operación directa del predio.

---

* Estando ya terminada esta tesis tuvimos conocimiento de trabajos recientes que ~~permiten~~ permitirían abordar este problema. Véase:

LEE, E. Stanley. Quasilinearization and the estimation of parameters in differential equations. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, Washington, D.C., 7(1):152-8, 1968.

LEE, E. Stanley. Invariant imbedding - A versatile computational concept. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, D.C., 60(9):55-64, 1968.

CONTROL.-

El plan de manejo calculado se basa en valores iniciales conocidos del estado del bosque y de los precios y costos, y en valores posteriores predichos por el modelo del bosque y el modelo de precios y costos (figura 2). En consecuencia, los valores iniciales de las variables de control calculados, o sea las características de las intervenciones a realizar en el momento de calcular el plan de manejo, optimizan el modelo. Sin embargo, el efectuar las intervenciones posteriores de acuerdo al plan optimiza el modelo únicamente si el estado del bosque y los precios y costos coinciden con los valores previstos.

Normalmente, debido a las características aleatorias del proceso, los valores reales tenderán a desviarse cada vez más de los previstos por el modelo. Aparece entonces la necesidad de determinar el estado del bosque y del mercado y recalcular el plan de manejo periódicamente. Este control periódico tiene un costo, al igual que las desviaciones del manejo óptimo. El problema radica entonces en determinar la forma y periodicidad más convenientes para esta reactualización.

El control del estado del bosque implica generalmente efectuar un inventario. Además de la periodicidad del inventario interesa determinar la intensidad de muestreo más adecuada, ya que de ésta dependerá por un lado la precisión con que se conocería el estado del bosque y por otro lado el costo del inventario.

El control de los precios y costos es más fácil, limitándose el costo de la reactualización del modelo de precios y costos casi exclusivamente a los costos de computación. Si se tiene programado el modelo de decisión los costos de computación son relativamente bajos, y probablemente en muchos casos convendrá recalcular anualmente el plan de manejo con los nuevos valores de precios y costos. La reactualización del estado del bosque en el modelo seguramente no convendría hacerla con tanta frecuencia debido a que las desviaciones de la predicción son generalmente menores que en el caso de los precios, y al costo de los inventarios, aunque la reducción de costos

que se puede obtener con los métodos de inventario forestal continuo con procesamiento electrónico de los datos puede aportar mucho en este aspecto.

Aparentemente no existen estudios publicados sobre el problema del control óptimo en manejo forestal. La dificultad principal estriba en la estimación de la magnitud esperada de las desviaciones de las predicciones y del efecto de estas desviaciones en la efectividad.

La forma obvia de abordar el problema es a través de modelos estocásticos. En un modelo estocástico podría agregarse la realización de controles y las características de éstos a las variables de control, y los costos de los controles en el modelo de precios y costos. De este modo se incluiría el control como parte del plan de manejo. Es evidente, sin embargo, que para llegar a esto es necesario todavía investigar muchos aspectos de la teoría del manejo.

Además de los desvíos de los valores esperados, pueden producirse también cambios en los supuestos del modelo. Es necesario tener siempre presente el conjunto de supuestos en el que éste está basado, pues es posible que alguno de ellos deje de ser aceptable debido a algún cambio en las condiciones externas.

Otro aspecto que debe controlarse es la posibilidad de mejoramiento del modelo. Frecuentemente la acumulación de antecedentes y los avances en la teoría pueden hacer aconsejable estimar nuevamente los parámetros, cambiar la forma de algunas relaciones o incluso construir un nuevo modelo completamente distinto. Esto indica la importancia de la recolección de información sobre los resultados de la aplicación de alternativas de acción, y el uso de esta información en las próximas decisiones (feedback de información). De esta manera, de acuerdo con Gould y O'Regan (43), " la planificación podría entonces llegar a ser un sistema verdaderamente dinámico para efectuar el mejor ajuste continuo posible entre el hombre y su medio".

CONCLUSIONES

Hemos visto como, considerando el manejo de un bosque como un problema de decisión y tomando ideas de la investigación de operaciones, puede construirse un marco conceptual para el estudio coordinado de los diversos aspectos del manejo. De este modo se hace posible investigar separadamente los "subproblemas" que aparecen, sin abandonar la visión del conjunto.

Hemos analizado también brevemente, estos subproblemas, poniendo especial cuidado en formularlos en la forma más concreta y explícita posible, y examinado las posibles maneras de abordarlos. Se observa que en muchos casos las soluciones disponibles distan bastante de ser satisfactorias, siendo evidente la necesidad de investigación en diversos aspectos de la teoría del manejo forestal.

Probablemente el punto más débil del manejo estriba en la falta de modelos de rodal adecuados. La posibilidad de hacer una predicción cuantitativa de los efectos de un determinado plan de manejo es un prerequisito indispensable para optimizar el manejo de un bosque. Sin embargo, sólo se dispone de conocimientos rudimentarios sobre la respuesta del bosque a las intervenciones silviculturales. Creemos por lo tanto, que el estudio de la teoría del desarrollo del bosque debería tener una atención preferente en las investigaciones en manejo forestal, y que la forma más productiva de abordar este estudio es a través de lo que hemos llamado modelos de nivel 2.

El hecho de que el manejo forestal deba considerar aspectos muy diversos de la actividad forestal hace deseable el trabajo interdisciplinario. Idealmente, los integrantes de un equipo de investigación en manejo deberían abarcar, entre otras, las especialidades de silvicultura, fisiología vegetal, dasometría, economía, mercado, explotación, protección, estadística y matemáticas. En todo caso, aunque no se efectúe investigación en equipo, sería deseable una mejor coordinación entre los distintos especia-

listas, teniendo presente el objetivo general de un mejor manejo de los bosques. En nuestra opinión, las necesidades del manejo exigen un enfoque más cuantitativo en silvicultura y fisiología, tratando de obtener relaciones matemáticas por aproximadas que éstas sean. Asimismo, en dasometría sería conveniente darle más importancia a los fundamentos silvícolas y fisiológicos, evitando en lo posible las ecuaciones puramente empíricas.

Para las plantaciones de pino insigne en Chile es urgente desarrollar e implementar un modelo de decisión que permita contar a la brevedad posible con una base para el manejo racional. Convendría desarrollar primero un modelo sencillo que pudiera implementarse con la información disponible en la actualidad y ser aplicable de inmediato. Paralelamente y a continuación se investigaría más a fondo para ir mejorando este modelo preliminar y eventualmente reemplazarlo por otro más elaborado.

APENDICE. UN MODELO SIMPLE DE RODAL Y SU SIMULACION ANALOGA.

MODELO.-

El modelo de rodal aquí planteado se basa en una serie de supuestos sobre el desarrollo de un rodal coetáneo, y es probablemente el modelo más simple que podría representar adecuadamente el desarrollo de un rodal manejado. Los supuestos principales son los siguientes:

a) La densidad del rodal se mantiene siempre lo suficientemente alta como para que haya un aprovechamiento total del sitio.

b) La densidad del rodal se mantiene siempre lo suficientemente baja como para que la mortalidad natural sea despreciable.

c) El incremento en volumen de los fustes es una proporción constante del incremento total bruto en peso seco del rodal.

d) El factor de forma se mantiene constante.

e) El incremento en altura es constante (la relación altura-edad es lineal) e independiente del manejo.

El incremento bruto en peso seco del rodal es igual a la asimilación fotosintética menos las pérdidas por respiración (59). Cumpliéndose el supuesto a), la asimilación fotosintética media por unidad de superficie será una constante, para un sitio determinado. La respiración puede considerarse proporcional a la cantidad de tejidos vivos, o sea aproximadamente proporcional a la superficie de los fustes (59), la cual es proporcional al diámetro medio por la altura media y por el número de árboles. Usando además el supuesto c), el incremento esperado en volumen por unidad de tiempo sería

$$\frac{dV}{dt} = a - bNHD \qquad /12/$$

donde: V = volumen por hectárea (m^3/ha)

N = número de árboles por hectárea

H = altura media (m)

D = DAP medio (m)

t = tiempo (años)

a, b = constantes.

Usando el supuesto d) podemos escribir

$$V = fBH \qquad /13/$$

siendo B el área basal en metros cuadrados por hectárea y f el factor de forma cilíndrico a la altura del pecho. Además, por definición

$$B = \frac{\pi}{4} ND^2 \qquad /14/$$

Como es costumbre, el DAP medio corresponde a la media cuadrática de los DAP.

Por último, de acuerdo con el supuesto e)

$$\frac{dH}{dt} = c. \qquad /15/$$

Este último supuesto parece cumplirse satisfactoriamente en pino insigne, ya que los datos de altura de dominantes y codominantes en función de la edad, generalmente se ajustan bien a una recta que pasa por el origen, por lo menos hasta los 25 o 30 años de edad. Véanse, por ejemplo, los datos de Contreras (25, pág. 3). Además, se ha observado que la altura media se puede estimar decontando una cantidad fija de la altura de los dominantes y codominantes (78,84). La altura media en función de la edad sería entonces

$$H = \frac{\text{Indice de sitio}}{\text{Edad clave}} \cdot \text{Edad} - k ,$$

o sea

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\text{Indice de sitio}}{\text{Edad clave}} = c.$$

Según las ecuaciones /12/ a /15/, el desarrollo del rodal puede describirse por el sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = a - bNHD \\ \dfrac{dH}{dt} = c \\ V = fBH \\ B = \dfrac{\pi}{4} ND^2 \end{cases} , \qquad /16/$$

conjuntamente con las condiciones iniciales

$$V(0) = V_o$$

$$\text{y} \qquad H(0) = H_o \ .$$

El valor de N se considera constante en los períodos entre raleos, de acuerdo con el supuesto b).

Se puede observar que para describir el estado del rodal bastarían tres variables de estado* como por ejemplo N, V y H, o B,D y H, ya que de estas variables se puede pasar a las otras dos usando relaciones algebraicas conocidas. Así, si usamos el vector de estado [N H V] , podemos plantear el modelo en una forma más de acuerdo con los conceptos del capítulo 2 :

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = a - b\sqrt{NHV} \\ \dfrac{dH}{dt} = c \\ \dfrac{dN}{dt} = 0 , \end{cases} \qquad /17/$$

$$V(0) = V_o \ ; \quad H(0) = H_o ; \quad N(0) = N_o \ .$$

Como vector de control podría considerarse el vector unidimensional $[\Delta N]$.

---

* En el sentido de que dos rodales que tienen idénticos valores de estas variables se comportarían en igual forma.

Debe admitirse que los supuestos adoptados para desarrollar el modelo son aproximaciones groseras que no se cumplen exactamente en la realidad. Sin embargo, luego de comprobar sus concordancia con datos experimentales, los modelos que tienen cierto significado físico son más confiables que los modelos obtenidos exclusivamente por ajustes empíricos.

SIMULACION.-

Se efectuaron simulaciones de manejo usando el modelo descrito en el computador análogo EAI TR-48 de la Universidad de Concepción.

El computador está constituído por cierto número de circuitos electrónicos (módulos) que pueden conectarse entre sí de diversas maneras. Los valores de las variables se representan por los voltajes presentes en distintos puntos del circuito, siendo el tiempo la variable independiente. Los módulos pueden cumplir diversas funciones; pueden producir un voltaje de salida que sea la suma, el producto o el cuociente de los voltajes de entrada, pueden integrar, extraer raíz, etc. Además se usan resistencias variables (atenuadores) que cumplen la función de multiplicar por constantes. Los voltajes que representan los valores de las variables se miden en los puntos adecuados y se pueden leer en un voltímetro digital, observarse como curvas en función del tiempo en una pantalla, o bien obtenerse las curvas trazadas en papel por un aparato graficador.

Por conveniencia, las ecuaciones /16/ se escribieron en la forma :

$$\begin{cases} \dot{V} = a - bNHD \\ D^2 = \dfrac{4}{\pi f} \dfrac{V}{NH} \\ B = \dfrac{\pi}{4} ND^2 \\ \dot{H} = c \ . \end{cases}$$

En la figura 3 se observa un circuito análogo preliminar para estas ecuaciones.

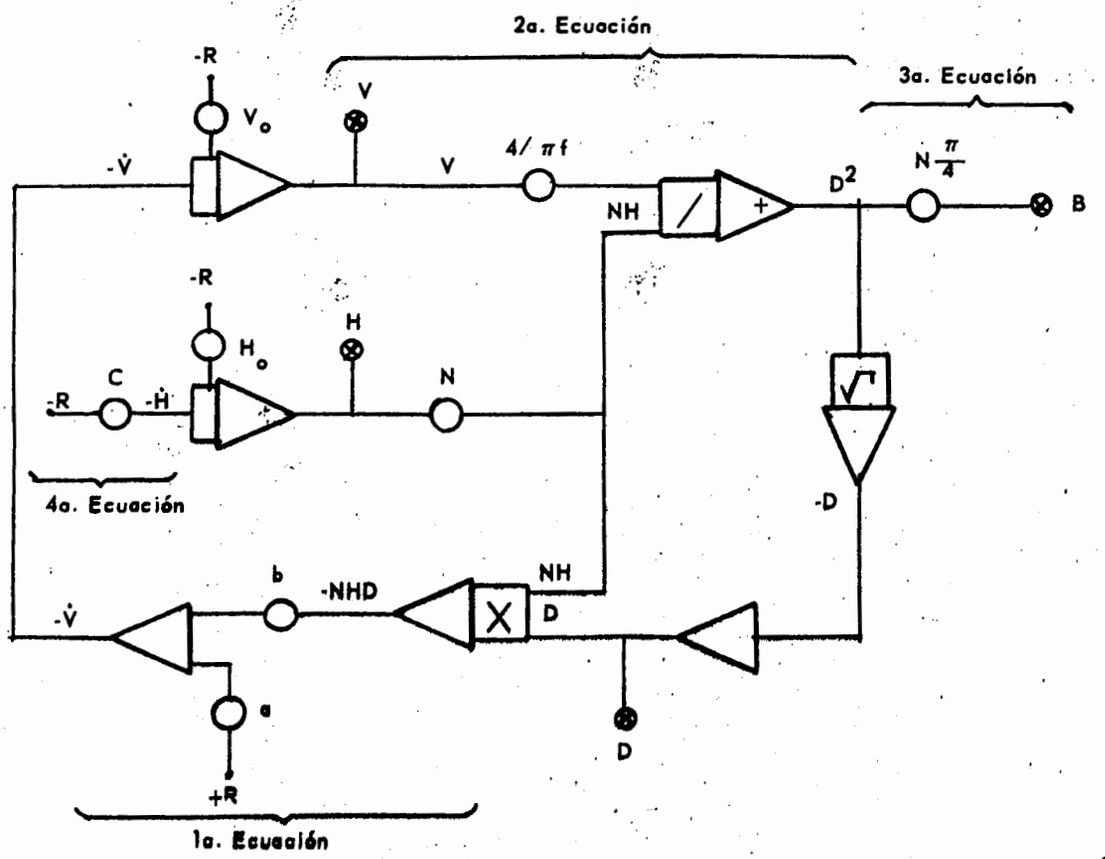
La constante c se fijó en 1,3, lo que corresponde a un índice de sitio de 26 m a los 20 años. Como factor de forma se usó o,46. Las constantes a y b se dejaron como parámetros para estudiar su influencia en la forma de las curvas obtenidas.

Como el computador no puede trabajar con valores mayores de uno, en valor absoluto, es necesario usar variables transformadas (variables de máquina) que se obtienen dividiendo las variables del problema por números superiores a sus valores máximos estimados. Las variables de máquina usadas fueron las siguientes:

Variable del problema	Variable de máquina
V	$V' = V/800$
D	$D' = D/0,5$
B	$B' = B/60$
H	$H' = H/40$
$\dot{V}$	$\dot{V}' = \dot{V}/80$
$\dot{H}$	$\dot{H}' = \dot{H}/1,5$
N	$M' = N/2000$
a	$a' = a/160$
b	$b' = b/0,02$

Además se agregaron atenuadores para retardar la velocidad de la simulación en un factor β. Posteriormente se encontró adecuado un valor $\beta = 5$. El circuito definitivo, luego de las modificaciones necesarias para el escalamiento, es el de la figura 4.

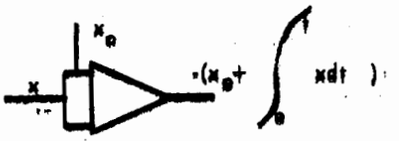
Se hizo una simulación de la respuesta de un rodal a un raleo a los 14 años y otro a los 20 años. En cada raleo se extraería un 35 % de los árboles. Para simplificar su supuso que los raleos serían sistemáticos, o sea que al ralear no cambiaría el DAP medio. También podrían haberse supuesto raleos selectivos introduciendo factores de corrección adecuados.



SIMBOLOS:

Inversor de signo

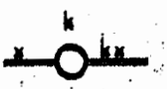
Sumador



Integrador

Multiplicador

Divisor



Atenuador

Extractor de raíz

Salida

$^{+}_{-}$R= Voltaje de referencia, nominalmente + 1 ó -1

F I G U R A 3

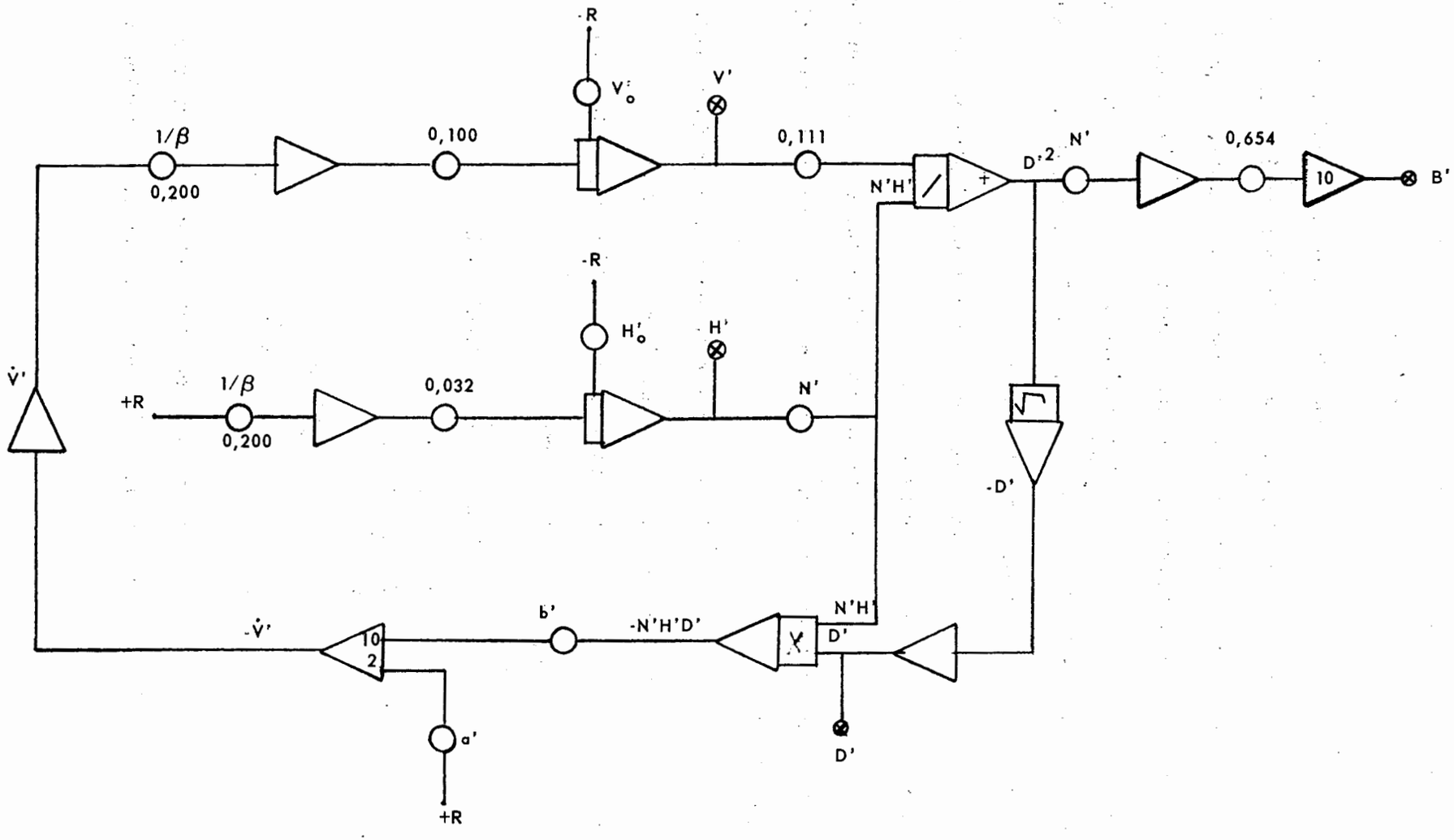

-R
V'o
V'
1/β
0,100
0,111
N'H'
D'2
N'
0,654
10
B'
0,200
-R
H'o
H'
+R
1/β
0,032
N'
0,200
V̇'
-D'
b'
N'H'
-V̇'
10
2
-N'H'D'
D'
a'
D'
+R

FIGURA 4

Para obtener resultados razonables, se tomó como base el inventario de un fundo de la zona de Concepción. El inventario se refería a rodales sin ralear. De acuerdo a estos datos, se partiría a los 14 años con 1.650 árboles por hectárea, una altura media de 16 metros y un volumen de 250 metros cúbicos por hectárea. El primer raleo reduciría entonces el número de árboles por hectárea de 1.650 a 1.073, y el segundo raleo de 1.073 a 697 árboles por hectárea.

Los valores de a y b se ajustaron arbitrariamente "sintonizando" el modelo de manera que:

i) Después del primer raleo el volumen tendiera prácticamente a igualarse con el volumen de un rodal no raleado alrededor de los 22 años.

ii) El incremento en el D/P medio inmediatamente después del primer raleo fuera de unos 3 cm. en el año.

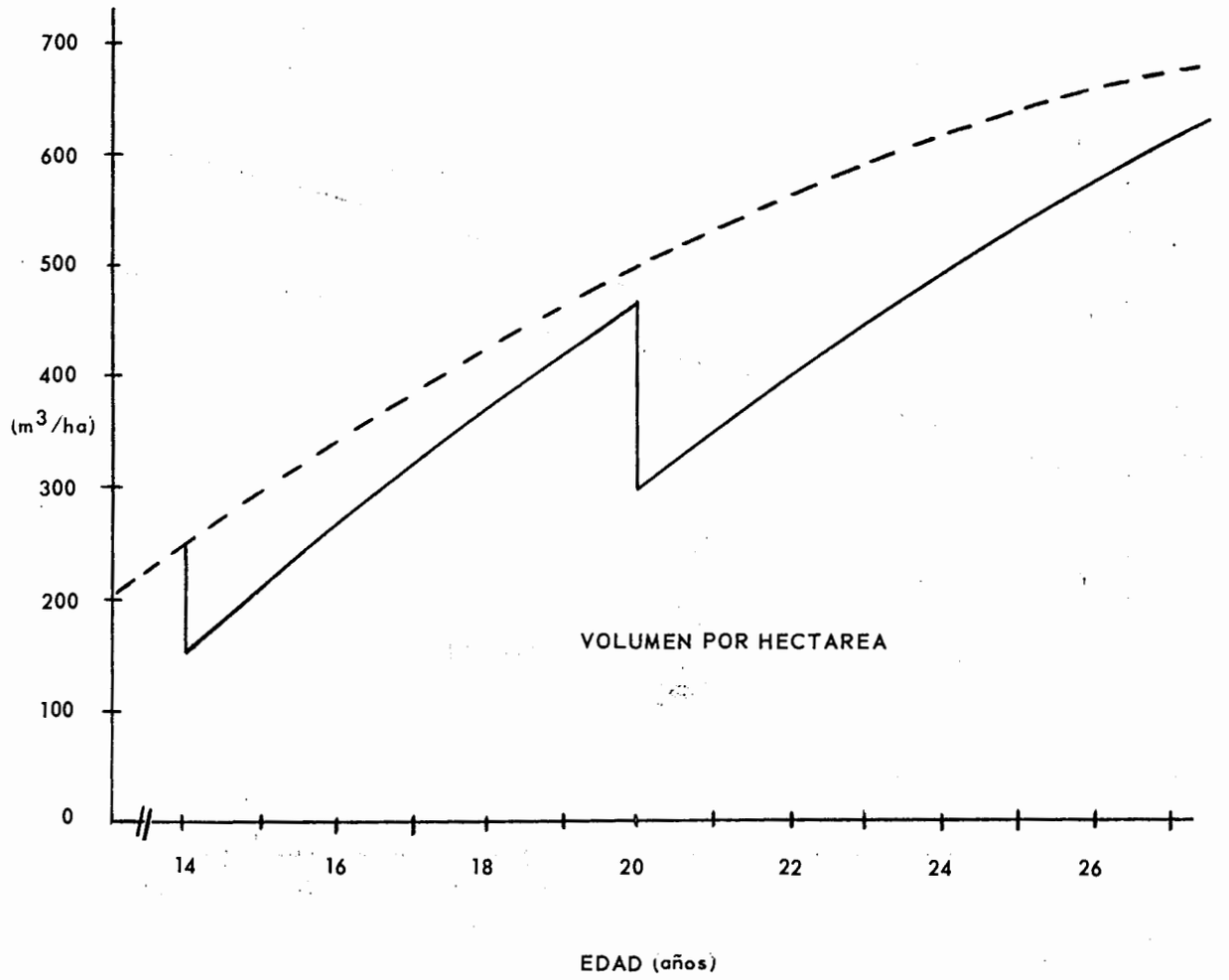
De esta manera se fijó a = 80 y b= 0,007.

Las ecuaciones usadas fueron entonces:

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = 80 - 0{,}007 \ NHD \\[2ex] \dfrac{dH}{dt} = 1{,}3 \\[2ex] V = 0{,}46 \ BH \\ B = 0{,}785 \ ND^2 \end{cases}$$

Las curvas obtenidas se reproducen en los gráficos 1 y 2. Las líneas de puntos son las correspondientes a rodales no raleados.

GRAFICO 1. SIMULACION ANALOGA DE RALEOS



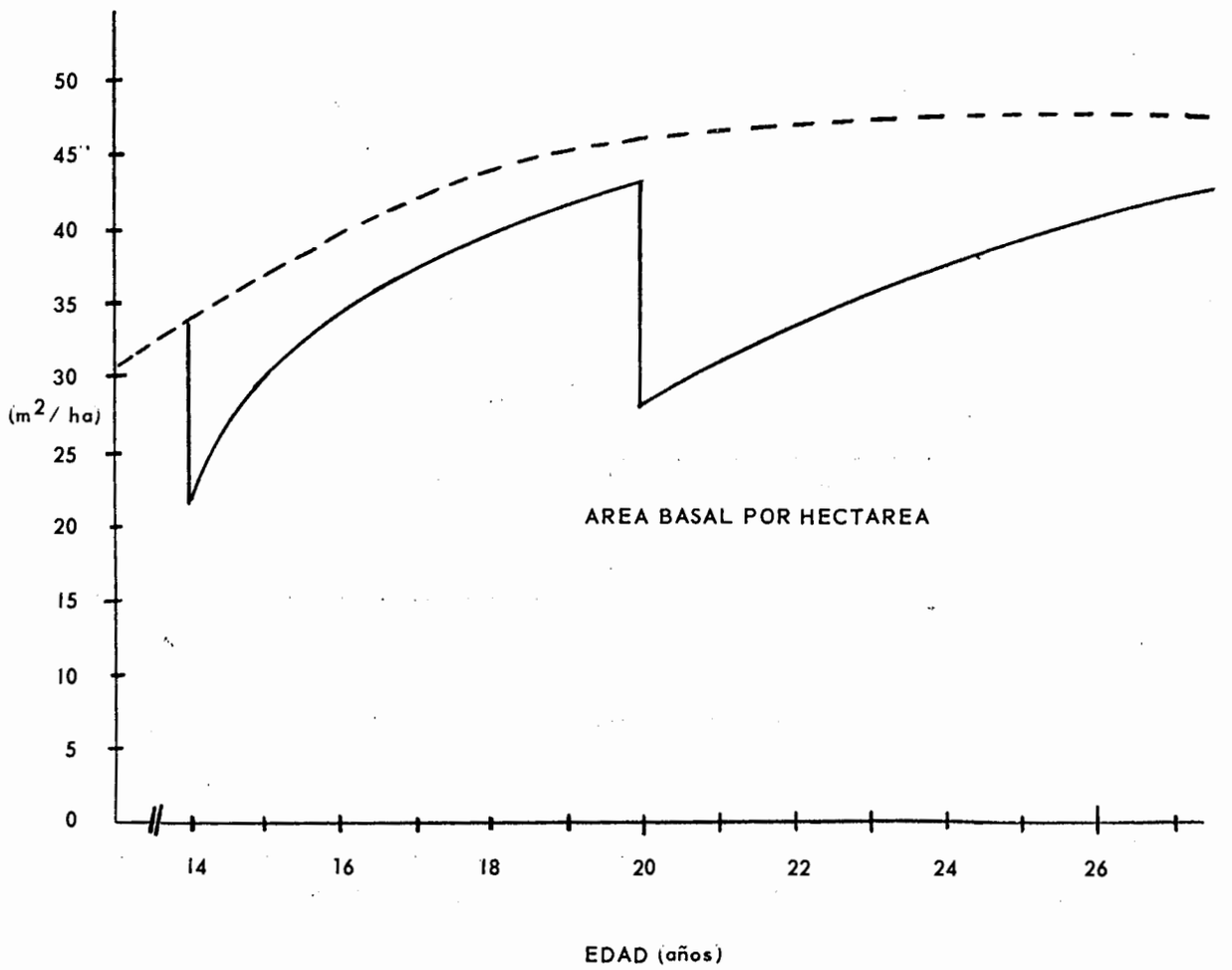
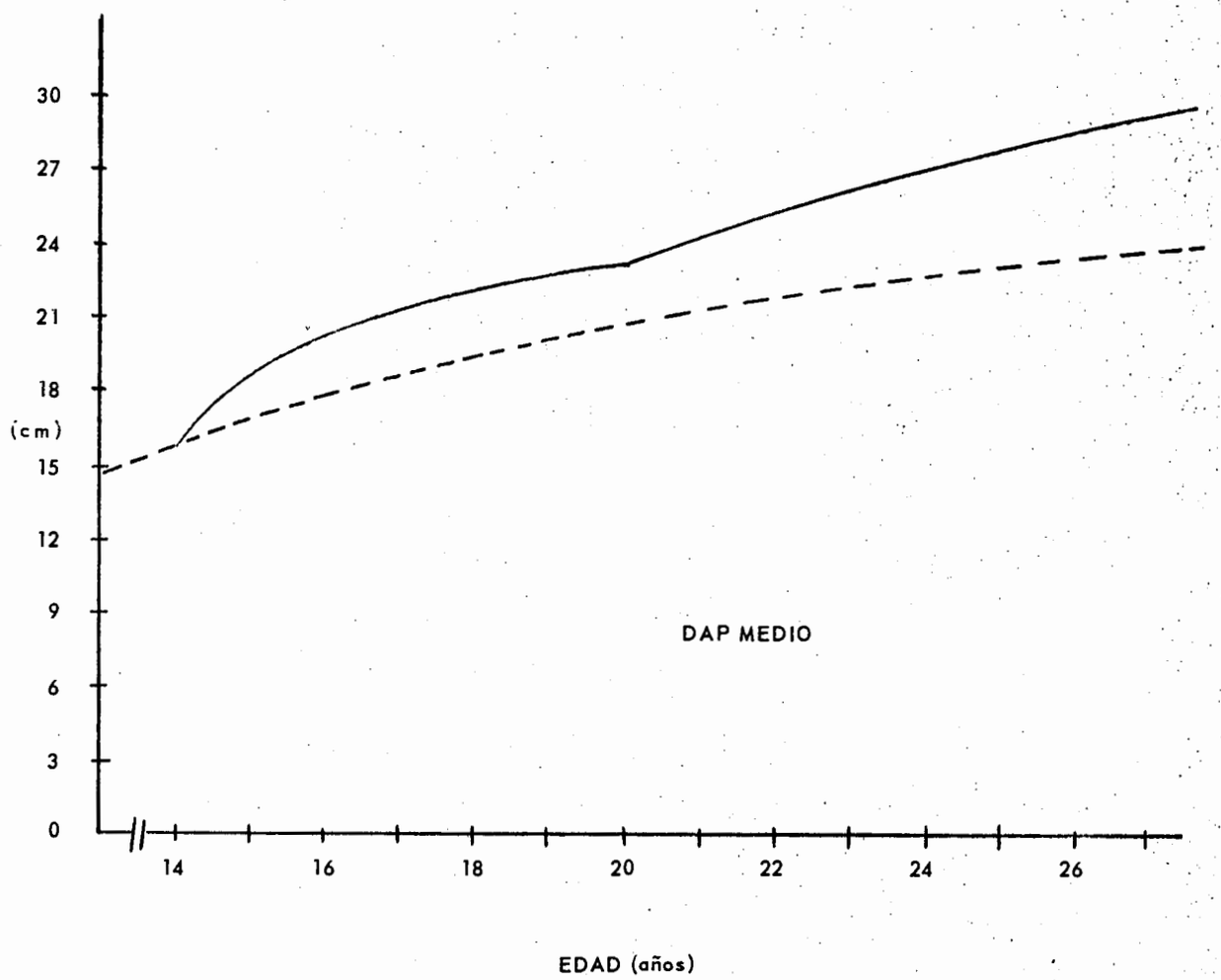
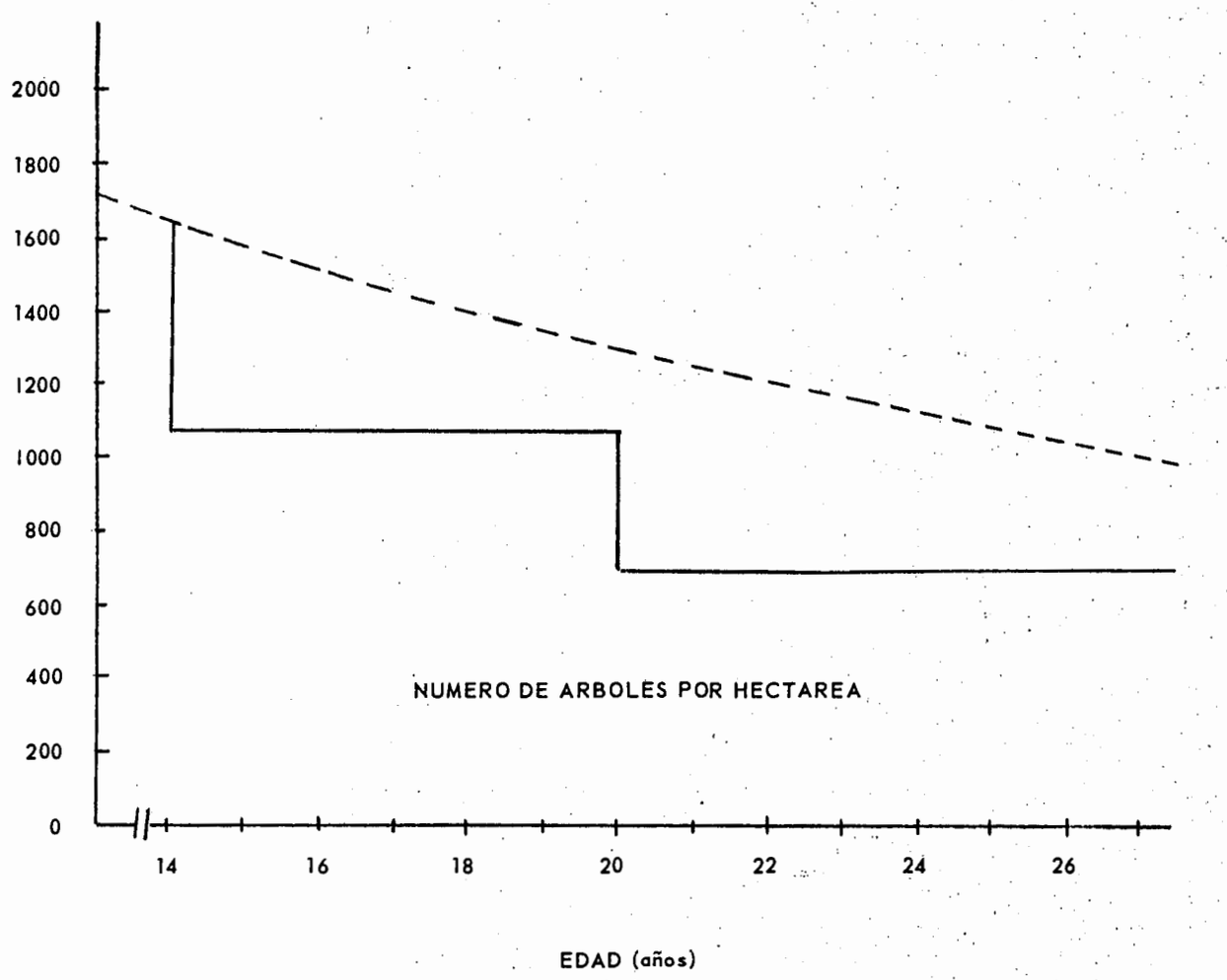


GRAFICO 2. SIMULACION ANALOGA DE RALEOS





RESUMEN

En esta tesis se trata la teoría del manejo de las plantaciones forestales, considerado éste como un proceso de decisión. En el enfoque adoptado se ha usado parte de las ideas y de la terminología de la investigación de operaciones y de la teoría del control. Se le ha asignado atención preferente a los fundamentos conceptuales para el desarrollo de modelos de decisión en el manejo forestal. Además se analizan brevemente los antecedentes disponibles, los problemas que se presentan y posibles formas de abordarlos.

Es de primordial importancia la formulación precisa del problema, definiendo claramente los objetivos y las alternativas de acción posibles. La medida de efectividad para evaluar planes de manejo puede tomar la forma de un ingreso neto total actualizado, o de una tasa interna de retorno, según los objetivos y características de la empresa.

La construcción del modelo puede abordarse considerando separadamente varios submodelos: un modelo de evaluación, un modelo de precios y costos y un modelo del bosque. En muchos casos se puede aceptar que el manejo óptimo del bosque se obtiene optimizando independientemente el manejo de los rodales que lo componen. Los modelos de rodal pueden contemplar diversos niveles de detalle. Además, estos modelos pueden ser determinísticos o estocásticos, tratando en este caso el desarrollo del rodal como un proceso estocástico de Markov.

Los resultados de la aplicación de un determinado plan de manejo pueden predecirse a partir del modelo mediante la simulación análoga o digital. Además, en modelos complejos, la simulación puede ser la única forma de llegar a un plan de manejo que se acerque al óptimo. Si se cuenta con un modelo matemático no demasiado complicado, la programación dinámica es la técnica de optimización más adecuada.

La estimación de los valores de los parámetros del modelo puede hacerse en base a datos de parcelas permanentes y/o parcelas temporales en las cuales se hayan medido incrementos.

Las características aleatorias del proceso de desarrollo del bosque y de las condiciones de mercado, hacen que los valores reales tiendan a desviarse cada vez más de los valores predichos por el modelo, al transcurrir el tiempo. Surge entonces el problema de determinar la periodicidad y características más adecuadas de la reactualización y recalculamiento del plan de manejo. Este problema podría abordarse a través de modelos estocásticos, incluyendo las características de este control como parte integrante del plan de manejo.

Se incluye como apéndice un ejemplo simple de modelo determinístico de rodal, y su simulación en un computador análogo.

SUMMARY

The subject of this thesis is management of forest plantations, considered as a decision-making process. The approach adopted has made use of some of the ideas and terminology of operations research and of control theory. Special attention has been given to the conceptual basis of the development of decision models in forest management. In addition, available knoledge is briefly analyzed, as well as current problems and possible approaches to their solution.

Precise formulation of the problem clearly defining the objetives and alternatives of possible action is of primary importance. Effectiveness measures for management plans can take the form of the present value of the total net income or of an internal rate of return, depending upon the objetives and characteristics of the firm.

The construction of the model can be approached through separate consideration of various submodels: a model of evaluation, a model of prices and costs, and a model of the forest. In many cases it is true that optimum management of the forest is obtained by optimizing independently the management of the stands of which it is composed. The models for stands may represent various levels of detail. In addition these models may be deterministic or stochastic, dealing in this case with the development of stands as a Markovian stochastic process.

The results of the application of a management plan can be predicted by means of analog or digital simulation. Besides, for complicated models, simulation may be the only method of determining a near optimum plan. If a mathematical model which is not very complicated is used, dynamic programming is the optimizing technique most adequate.

The estimation of the parameter values of the model can be based on data from permanent plots, and/or temporary plots in which increments have been measured.

The random characteristics of forest development and of the market conditions make that the real values tend to differ more each time from the values predicted by the model, as time elapses. This brings out the problem of determining the most adequate periodicity and characteristics of the updating and recalculating of the management plan. This problem could be approached through stochastic models, incluiding the characteristics of this control as a part of the management plan.

As an apendix, an example of a simple deterministic stand model is included, as well as its simulation in an analog computer.

BIBLIOGRAFIA

1. ACKOFF, R.L. (Ed.). Progress in operations research. New York, Wiley, 1961. v.1.

2. ADOLPH, E.F. Quantitative relations in the physiological constitution of mammals. Science, London, (109):579-85, 1949.

3. ARIMIZU, T. Working group matrix in dynamic model of forest management. J. Japanese Forestry Society, Tokyo, 40:185-90, 1958.

4. ASTORGA Schneider, Eduardo. Estudio económico de la poda en pino insigne (Pinus radiata D. don). Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, 1960. 46 p. (Tesis).

5. BELLMAN, Richard. On the application of the theory of dynamic programming to the study of control processes. Paper presented at the Symposium on Nonlinear Circuit Analysis, Polytechnic Institute of Brooklyn, April 25-27, 1956. In: Bellman, R. and Kalaba, R. (ed.), Selected papers on mathematical trends in control theory. New York, Dover Publications, 1964. p. 179-93.

6. ----- Dynamic programming. Princeton, N.J., Princeton University Press, 1957.

7. ----- Control theory. Scientific American, New York, 211(3):186-200, 1964.

8. ----- and DREYFUS, S.E. Applied dynamic programming. Princeton, Princeton University Press, 1962.

9. ----- and KALABA, R. Dynamic programming and adaptive processes: Mathematical foundation. Reprinted from: IRE Transactions on Automatic Control. AC 5(1): 5-10, 1960. In: Bellman, R. (Ed.) Selected papers on mathematical trends un control theory. New York, Dover Publications, 1964. p. 195-200.

10. ----- and------ Selected papers on mathematical trends in control theory New York, Dover Publications, 1964. 200 p.

11. BENNETT, Gilbert A. et alii. Numerical integration of differential equations. New York, Dover Publications, 1956. 108 p.

12. BENTLEY, William R. and TEEGUARDEN, Dennis E. Financial maturity: a theoretical review. Forest Science, Washington, D.C., 11(1):76-87, 1965.

13. BERTALANFFY, L. von. Problems of organic growth. Nature, London, 163: 156-8, 1949.

14. ----- The theory of open systems in physics and biology. Science, Washington D.C., 111:23-9, 1950.

15. ----- Quantitative laws in metabolism and growth. Quart. Rev. Biol., Washington, D.C., 32(8):217-31, 1957.

16. BEVERTON, R.S.H. and HOLT, S.S. On the dynamics of exploited fish populations. London, Min. Agr. Fish, and Food. 1957. 533 p. (Fishery Inv. Ser. II, 29).

17. BICKFORD, C. et alii. Stocking, normality and measurement of stand density. Journal of Forestry, Washington D.C., 55:99-104, 1957.

18. BRIEGLEB. Progress in estimating trend of normality percentage in second growth Douglas fir. Journal of Forestry, Washington, D.C., 40:785-93, 1942.

19. BRODY, S. Bioenergetics and growth. New York, Reinhold, 1945.

20. BRUCE, Donald and SCHUMACHER, Francis X. Medición forestal. México, Centro Regional deAyuda Técnica (AID), 1950. xvi, 474 p.

21. BRYANT, Ben. S. The significance of specific gravity distribution with respect to tree form. For. Cl. Quart., Seattle, 24(1):18-24, 1950.

22. BUTTRICK, P.L. Forest economics and finance. New York, Wiley, 1943. xviii, 484 p.

23. CASASEMPERE Coulon, Alfonso. Estudio comparativo de rentabilidad entre ovejería y pino insigne (Pinus radiata D. don). Provincias de Bío-Bío y Malleco. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, 1967. 148 p. (Tesis)

24. COMISION ECONOMICA PARA AMERICA LATINA. Manual de proyectos de desarrollo económico. México, Maciones Unidas, 1958. 263 p.

25. CONTRERAS V., Manuel. Indices de sitio para pino insigne (Pinus radiata D. don). Santiago, Universidad de Chile, Escuela de Ingeniería Forestal, 1967. 5 p.

26. COX, D.R. and MILLER, H.D. The theory of stochastic processes. London, Methuen, 1965. 398 p.

27. CURTIS, F.H. Linear programming the management of forest property. Journal of Forestry, Washington, D.C., 6C:611-6, 1962.

28. CURTIS, R.O. A method of estimation of gross yield of Douglas-fir. Washington, D.C., Society of American Foresters, 1967. 24 p. (For. Sci. Monogr. 13).

29. CHAPELLE, Daniel E. A computer program for calculating allowable cut using the area-volume check method. Portland, Ore., Pacific Northwest For. and Range Exp. Sta., 1966. 4 p. (Res. Note PNW-44).

30. CHURCHMAN, West C. et alii. Introduction to operations research. Wiley International Ed., New York, 1966. x, 645 p.

31. DAHMS, Walter C. Relationship of lodgepole pine volume increment to crown competition factor, basal area, and site index. Forest Science, Washington, D.C., 12(1):74-82, 1966

32. DAVIS, Keneth P. American forest management. New York, McGraw-Hill, 1954. 482 p.

33. DECKER, J.P. Some photosynthetic problems of tree growth. In: Kozlowsky, T.T. (Ed.), Tree growth. ~~New growth~~. New York, Ronald Press, 1962.

34. DOERNER, K.F. Jr. Some causes and effects of Horizontal density variations in tree stems. Forest Science, Washington, D.C., 10: 24-7, 1964.

35. ----- Some dimensional relationships and form determinants of trees. Forest Science, Washington, D.C., 11(1):50- , 1965.

36. DOOB, Joseph L. Stochastic processes. New York, Wiley, 1964. 654 p.

37. DREYFUS, S.S. Dynamic programming. In: Ackoff, R.L. (Ed.), Progress in operations research. New York, Wiley, 1961. v.1.

38. DUERR, W.A. Comments on the general application of Gehrardt's formula for approach to normality. Journal of Forestry, Washington, D.C., 36:600-4, 1938.

39. DUFF, G.H. and NOLAN, N.J. Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. I. The controls of cambial and apical activity in Pinus resinosa Ait. Canad. Jour. Bot., 31(4):471-513, 1953.

40. FARRAR, J.L. Longitudinal variation in the thickness of the annual ring. For. Chron., 37(4):323-49, 1961.

41. FAURE, R. et alii. La investigación operativa. Buenos Aires, EUDEBA, 1966. 118 p. (Cuadernos de EUDEBA 110).

42. GOODE, H.H. and MACHOL, R.E. System engineering. New York, McGraw-Hill, 1957.

43. GOULD, Ernest M.Jr. and O'REGAN, William. Simulation. A step toward better forest planning. Petersham, Mass., Harvard Forest, 1965. 86 p. (Harvard Forest Papers 13).

44. HAMMING, R.W. Numerical methods for scientistis and engineers. International Student Edition. Tokyo, McGraw-Hill - Kogakusha, 1962. 411 p.

45. HOLLAND, I.I. An explanation of changing lumber comsumption and price. Forest Science, Washington, D.C., 6:171-92, 1960.

46. HOOL, J.N. A dynamic programming - Markow chain approach to forest production control. Washington, D.C., Society of American Foresters, 1966. (For. Sci. Monogr. 12).

47. HOWELL, R.S. Simulation by "Monte Carlo" methods. In: Mathematical models in forest management: Proceedings of the meeting held at the University of Edimburgh on 12th and 13th April 1965. p. 39-41. (England For. Com.: For. Rec. 59).

48. HUSCH, B. Forest mensuration and statistics. New York, Ronald Pres, 1963.

49. JOHNSON, Richard A. et alii. The theory and management of systems. International Student Edition. Tokyo, Mc-Graw-Hill - Kogakusha, 1963. 350 p.

50. JOHNSTON, J. Econometric methods. International Student Edition. Tokyo, McGraw-Hill - Kogakusha, 1963. 300 p.

51. KAUFMANN, A. and CRUON, R. La programación dinámica. México, CECSA, 1967. 307 p.

52. KRAJICEK, J.E. et alii. Crown competition: A measure of density. Forest Science, Washington, D.C., 7(1):35-42, 1961.

53. KRUEGER, Kenneth W. Investigating dominance in Douglas-fir stands. Portland, Ore., Pacific Northwest For. Range Exp. Sta. 1967. 10 p. (Res. Pap. PNW-43).

54. LARSEON, P.R. Stem form development of forest trees. Washington D.C., Society of American Foresters, 1963. 42 p. (For. Sci. Monogr. 5).

55. LEMMON, P.E. and SCHUMACHER, F.X. Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age and size. Forest Science, Washington, D.C., 8(3):236-49, 1962.

56. LOUCKS, D.P. The development of an optimun program for sustained yield management. Journal of Forestry, Washington, D.C., 62:485-90, 1964.

57. LYNCH, D.W. Measuring and predicting growth of even-aged stands. In: Kozlowski, T.T. (Ed.), Tree growth. New York, Ronald Press, 1962. p. 401-1f.

58. MEYER, Arthur H. et alii. Forest management. New York, Ronald Press, 1961. 282 p.

59. MOLLER, Carl Mar. The effect of thinning, age, and site on foliage, increment, and loss of dry matter. Journal of Forestry, Washington, D.C., 45:393-404, 1947.

60. MORGENTHALER, G.W. The theory and application of simulation in operations research. In: Ackoff, R.L. (Ed.), Progress in operations research. New York, Wiley, 1961. V.1.

61. NAUTIYAL, J.C. and PEARSE, P.H. Optimizing the conversion to sustained yield. A programming solution. Forest Science , Washington, D.C., 13(2):131-9, 1967.

62. NEWNHAM, Robert M. The development of a stand model for Douglas-fir. University of British Columbia, 1964. (Thesis). Abstract of thesis in: Disertation Abstracts, 26(7): 3567.

63. ------ and SMITH, J.H. Development and testing of stands models for Douglas-fir and lodgepole pine. For. Chron., Vancouver, B.C., 40(4): 494-502, 1964.

64. NUÑEZ del Prado, Arturo. Estimaciones muestrales en los modelos de experimentación numérica para decisiones de política económica. Trabajo presentado al Symposium de Investigación por Muestreo en Chile organizado por CEDEM. Santiago, Octubre 1968. (Mimeografiado).

65. PARKER, R.R. and LARKIN, P.A. A concept of growth in fishes. Jour. Fisheries Research Board of Canada, 16(5). 1959.

66. PARZEN, E. Stochastic processes. San Francisco, Holden-Day, 1964. 324 p.

67. PIENAAR, Leon Visser. Quantitative theory of forest growth. University of Washinton, 1965. (Thesis). Abstract of thesis in: Dissertation Abstracts, 26(5):2403.

68. RASHEVSKY, Nicolas. Mathematical principles in biology and their applications. Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1961. 128 p.

69. ROW, Clark. Determining forest investment rates-of-return by electronic computer. New Orleans, La., Southern Forest Expt. Sta., 1963. 13 p. (Res. Pap. SO-6).

70. SAATY, Thomas L. Mathematical methods of operations research. International Student Ed. Tokyo, McGraw-Hill- Kogakusha, 1959. xi, 421 p.

71. ----- and BRAM, Joseph. Nonlinear Mathematics. International Student Edition. Tokyo, Mc-Graw-Hill- Kogakusha, 1964. xv, 381 p.

72. SADOSKY, Manuel. Cálculo numérico y gráfico. 5a. ed. Buenos Aires, Ediciones Librería del Colegio, 1965. 355 p.

73. SASIENI, Maurice et alii. Operations Research: Methods and problems. International Ed. Tokyo, Wiley-Toppan, 1959. xi, 316 p.

74. SASSAMAN, Robert and CHAPELLE, Daniel. A computer program for calculating allowable cut using area regulation and a comparison with the ARVOL method. Portland, Ore., Pacific Northwest For. and Range Exp. Sta., 1967. 7 p. (Res. Note PNW-63).

75. SCHWEITZLER, A.P. Horizontal specific gravity variation in tree stems in relation to their support function. Forest Science, Washington, D.C., 8(1):111- , 1962.

76. SCHWEITZLER, Dennis L. et alii. A computer program for evaluating long tern forestry investments. St. Paul, Minn., North Central Exp. Sta., 1967. 34 p. (Res. Pap. NC-10).

77. SEGOVIA, H.H. et alii. Programación dinámica. Método para la evaluación de las alternativas de manejo en Pinus radiata D.don). Análisis. Santiago de Chile, (2):2-39, 1966.

78. SMITH, Harry G. Analysis of crown development can establish biological and economic limits to growth of trees and stands. Comm. For. Rev., London, 42(1) [111] :27-33, 1963.

79. ----- et alii. Importance of distribution and ammount of mortality can be defined by simulation studies. Comm. For. Rev., London, 44(3):188-192, 1965.

80. SMITH, Norman. Aspectos económicos del cultivo del pino insigne (Pinus radiata D. don) en la zona de Malleco. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, 1964. (Tesis).

81. TAKACS, L. Stochastic processes. Problems and solutions. London, Methuen, 1962.

82. TINTNER, Gerhard. Econometrics. New York, Wiley, 1965. xiii, 370 p.

83. VEZINA, P.E. and PECH, G.Y. Solar radiation beneath conifer canopies in relation to crown closure. Forest Science, Washington, D.C., 10(4):443-451, 1964.

84. WARRACK, G.C. Forecast of yield in relation to thinning regimes in Douglas-fir. Dep. of Lands and Forests, British Columbia Forest Service, 1959. 56 p. (For. Serv. Tech. Pub. T 51).

85. WHYTE, A.G.D. The influence of thinning on taper, on volume assortment outturn and on economic return of the Bowmont spruce sample plots. Comm. For. Rev., London, 44(2):109-22, 1965.

86. WILSON, Robert W. An approach to silvicultural control of growth in eastern white pine trees. Yale University, 1965. (Thesis). Abstract of thesis in: Dissertation Abstracts, 24(4):1848.

87. WOTHERSPOON, Roy. Plan de ordenación para plantaciones tributarias de una industria de papel y celulosa. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, 1966. 111 p. (Tesis).

88. ZADEH, Lotfi A. and RAGAZZINI, John R. An extention of Wiener's theory of prediction. Reprinted from: Jour. of Applied Physics, 21(7):645-55, 1950. In: Bellman, R. and Kalaba, R. (Ed.), Selected papers on mathematical trends in control theory. New York, Dover Publications, 1964. p. 152-62.