1. INTRODUCCION

La predicción del crecimiento y producción de madera en pie, para bosques en diversas condiciones de sitio y sometidos a diferentes alternativas u opciones silviculturales, constituye un problema importante del manejo forestal.

Esta predicción es requerida, entre otros aspectos del manejo forestal, para:

i) La determinación de la disponibilidad futura de madera, a objeto de programar la explotación de los bosques y de planificar nuevas inversiones forestales;

ii) la evaluación de tratamientos silviculturales alternativos, caso en el que interesa conocer la cantidad y calidad de la madera asociada a distintas opciones silviculturales; donde las alternativas pueden referirse, por ejemplo, al espaciamiento inicial de plantación, al tipo, intensidad y frecuencia de los raleos o a la edad de corta final; y

iii) la valoración o tasación de bosques, cuando interesa estimar el valor económico potencial de los rodales, ya sea para determinar su precio o para valorar las pérdidas y daños causados por agentes destructores y, evaluar métodos de control de esos agentes.

Con el propósito de predecir el comportamiento futuro de los bosques, es corriente en la actividad forestal, utilizar las denominadas "tablas de producción de madera en pie", llamadas comunmente tablas de rendimiento.

Una tabla de producción de madera en pie, consiste en un arreglo sistemático de datos relativos al estado de un rodal en determinados puntos de un intervalo de tiempo dado. En ella, se presentan valores promedios de ciertos atributos del rodal (tales como, número de árboles, área basal y volumen de madera por unidad de superficie), según calidades de sitio, de acuerdo a un tratamiento silvicultural determinado y generalmente, para condiciones de "densidad normal", arbitrariamente definida.

La información entregada por las tablas de producción es utilizada para predecir el desarrollo de bosques que están creciendo o que crecerán en condiciones similares a las de los rodales que generaron la información en ellas contenida.

No obstante, las tablas de producción no cubren el amplio rango de opciones silviculturales de que dispone el tomador de decisiones para el manejo forestal, ya que ellas se refieren a resultados de decisiones históricas implementadas en los rodales.

Tampoco, las tablas de producción consideran las condiciones particulares en que se puede encontrar el rodal cuyo desarrollo se quiere predecir, pudiendo estas condiciones diferir sensiblemente de los promedios en ellas señalados.

Es obviamente imposible estudiar la respuesta de los rodales, para cada uno de sus estados y frente a cada opción silvicultural, mediante experimentación directa efectuada en los bosques mismos. Aún cubriendo un rango reducido de posibilidades, la experimentación directa es costosa y requiere de muchos años para la obtención de los resultados esperados.

Sin embargo, cuando se dispone de datos de crecimiento y producción de rodales, o bien, cuando se diseñan experimentos con los bosques, es importante tener presente que es posible "interpolar" (y en menor grado "extrapolar") sobre la información recopilada, generando así datos simulados que permitan examinar de manera rápida y eficiente los resultados que se obtendrían a partir de opciones silviculturales hipotéticas.

Los modelos de simulación de rodal, son en esencia, medios para efectuar estas interpolaciones entre datos reales recogidos de la experimentación en terreno. Su empleo permite actualizar y proyectar inventarios forestales y examinar la respuesta de los bosques a un rango amplio de opciones silviculturales.

Es claro que la bondad de la interpolación, o simulación, es fuertemente dependiente de la calidad y cantidad de información real disponible. En ningún caso un modelo de simulación podrá generar mejores datos que aquellos utilizados en su construcción. Asimismo, es necesario destacar que los modelos de simulación del crecimiento y producción de rodales pueden construirse a diferentes niveles de detalle y complejidad, dependiendo tanto de la información disponible como de la requerida.

Los simuladores de rodales permiten estimar los efectos físicos de alternativas silviculturales. Esta estimación es evidentemente necesaria pero no suficiente para tomar una decisión respecto de qué alternativa seleccionar e implementar. Cuando se trata de escoger un plan de gestión para una unidad de administración forestal, los objetivos y restricciones de la empresa tienen un impacto determinante en la selección de las alternativas.

Con el fin de asistir a la toma de decisiones de manejo forestal otros tipos de modelos son necesarios. Ellos permiten determinar los mejores tratamientos silviculturales dado un conjunto de alternativas posibles, tomando en cuenta aspectos tecnológicos, financieros, de mercado y administrativos.

La necesidad de disponer, tanto de modelos de simulación del comportamiento de rodales, como de modelos estructurados para la toma de decisiones en la empresa, está por supuesto íntimamente ligada a la intensidad del manejo forestal y al tamaño de la empresa. Para el caso del manejo intensivo en grandes áreas, la demanda por estos modelos será alta. En contraste, en el manejo extensivo o en pequeñas propiedades forestales, donde las decisiones silviculturales son limitadas y poco deliberadas, la demanda será baja.

En este estudio se presentan conceptos metodológicos y se analizan trabajos reportados en la literatura extranjera, en relación a modelos de simulación de rodales (capítulos 2 y 3) y a modelos para la toma de decisiones de manejo forestal (capítulo 5), relevantes a las plantaciones de pino insigne en Chile. El capítulo 4 se refiere a la factibilidad de construir modelos de simulación para esta especie en el país. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones principales de este trabajo y; finalmente, la bibliografía seleccionada para las materias contenidas en este estudio se incluye en el capítulo 7.

2. SIMULACION DEL SISTEMA RODAL

En este capítulo se exponen brevemente algunos conceptos fundamentales usados en simulación de sistemas, con énfasis en lo aplicado a la simulación del crecimiento y producción de rodales forestales. El propósito es presentar la estructura general de un modelo de simulación, indicar las etapas involucradas en su construcción y uniformar la terminología que se emplea en los capítulos subsiguientes.

2.1 Conceptos fundamentales de simulación

Un sistema es un conjunto de elementos unidos por algún grado de interacción o interdependencia. Estos elementos pueden ser cualquiera entidad física, biológica o abstracta; las propiedades relevantes de los elementos son caracterizadas mediante atributos.

Cada elemento de un sistema puede considerarse a la vez como otro sistema y, asimismo, un sistema específico es a su vez un elemento de un sistema de más alto nivel. Al estudiar un conjunto de elementos interdependientes es, por ende, indispensable definir claramente el límite entre él y su medio o entorno.

El entorno de un sistema es el conjunto de sistemas que residen fuera y que interactúan con el sistema en consideración.

El estado de un sistema es una descripción de la condición en que se encuentran los elementos, atributos y entorno del sistema en un punto del tiempo.

Un modelo es una representación del sistema obtenida por abstracción de la realidad.

En la mayoría de los estudios no es posible o es innecesario considerar en el modelo todos los elementos y atributos de un sistema; lo cual implica que un modelo es una simplificación del sistema y, además, que no existe un modelo único de un sistema.

Simulación es "el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y de efectuar experimentos con ese modelo, a fin de entender el comportamiento del sistema real o de evaluar diferentes estrategias para la operación del mismo". Shannon (1975).

Los modelos de simulación pueden ser físicos o matemáticos. En los modelos físicos los atributos son representados por componentes físicos con propiedades similares a las de los elementos relevantes del sistema.

En este trabajo sólo interesan los modelos matemáticos. En ellos, los elementos de un sistema y sus atributos son representados por variables matemáticas, y los procesos o actividades que ocurren dentro del sistema son descritos mediante relaciones funcionales que interrelacionan las variables.

En el Cuadro 1 se presenta una clasificación de las variables y funciones utilizadas para describir un sistema a través de un modelo matemático.

En un tiempo t, definido sobre un intervalo dado, el estado o condición de un sistema es descrito por n números reales, X_{1t}, X_{2t}, ... X_{nt}, llamados variables de estado.

CUADRO 1. Clasificación de las variables y relaciones funcionales utilizadas para describir un sistema a través de un modelo matemático

- VARIABLES
  - DE ESTADO
    - EXOGENAS
    - ENDOGENAS
      - DINAMICAS O PREDICTORAS
      - DERIVADAS
  - DE CONTROL
  - DE RESPUESTA
- RELACIONES FUNCIONALES
  - DE TRANSICION
  - DE TRANSFORMACION

Las variables de estado exógenas residen fuera del sistema en consideración y caracterizan atributos de su entorno. Los valores de estas variables entran al modelo del sistema como datos; algunas veces, en la forma de una distribución de probabilidades.

Las variables de estado endógenas son aquellas cuyos valores son producidos o generados dentro del sistema. Si en el modelo, el cambio de valor de estas variables es obtenido como función del tiempo, ellas se denominan dinámicas o predictoras; en cambio, se llaman derivadas aquellas que se obtienen independientemente del tiempo.

En un tiempo t, del intervalo relevante, las decisiones para el manejo u operación del sistema son caracterizadas por m números reales, U_{1t}, U_{2t}, ... U_{mt}, denominados variables de control.

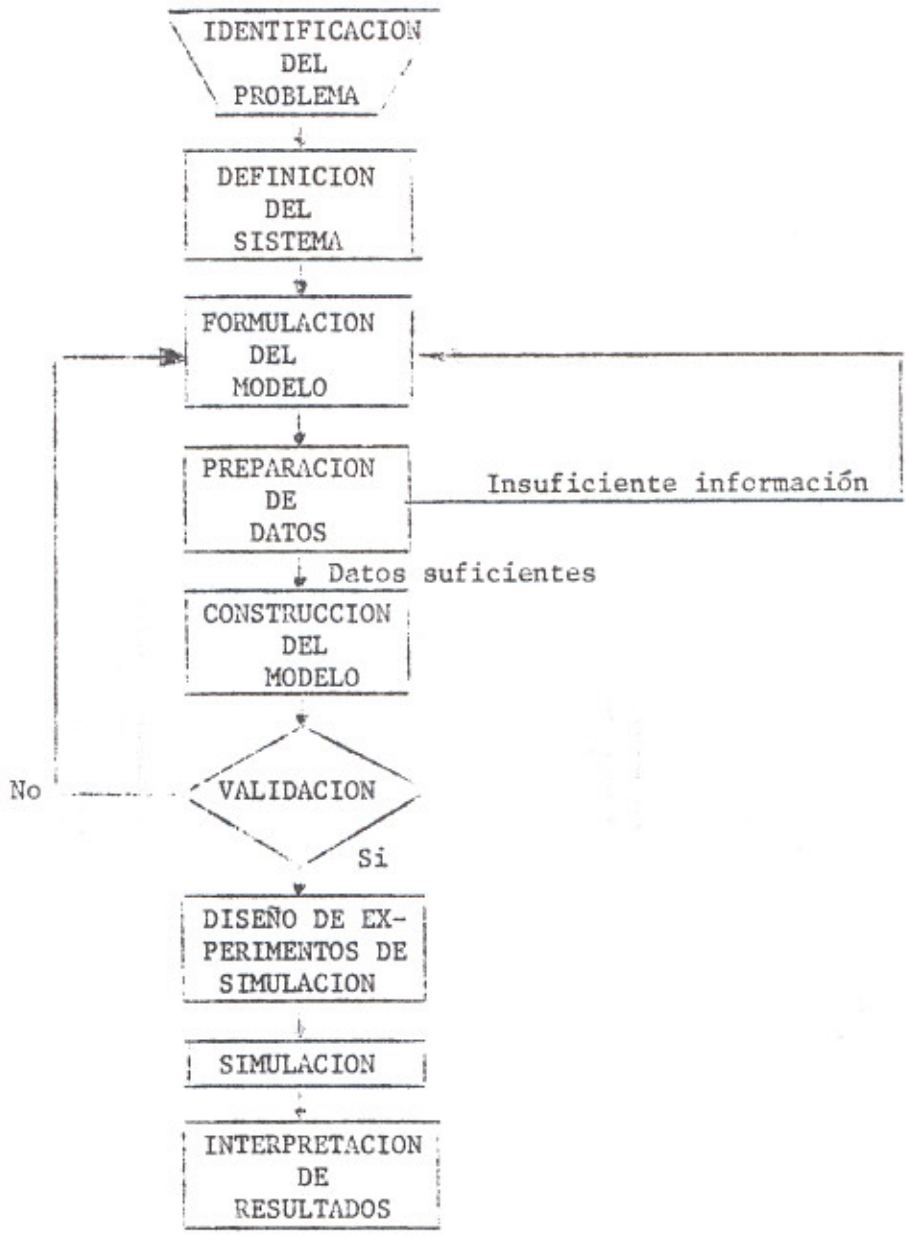
Las variables de respuesta se obtienen en función de variables de estado y de variables de control, y caracterizan los resultados de una decisión implementada sobre el sistema.

Las relaciones funcionales pueden ser de naturaleza determinística o estocástica. Las de transición describen el comportamiento de las variables dinámicas a través del tiempo y las de transformación generan variables derivadas y de respuesta.

El Cuadro 2 muestra las etapas involucradas en la simulación de un sistema real. Estas etapas deben ser vistas como un proceso iterativo, en el cual el resultado de cada fase debe compatibilizarse con el de las fases anteriores y, si es necesario, se deberá retornar a una etapa previa.

En la primera etapa se identifica el problema que da origen al estudio y se definen los objetivos del trabajo. En esta fase que

CUADRO 2. Etapas del proceso de simulación



da determinado el tipo de información que se desea genere el modelo de simulación.

Es útil señalar, a este nivel, las restricciones de tiempo y presupuesto dentro de las cuales se llevará a cabo el estudio y los criterios de validación de los resultados de la simulación.

La segunda etapa consiste en definir el sistema en consideración; determinando el límite entre él y su entorno y describiendo las actividades que caracterizan el manejo u operación del sistema.

En la etapa de formulación se establece la estructura del modelo. Para ello es necesario especificar los elementos, tanto del sistema como de su entorno, que serán incluídos en el modelo, y definir las variables de estado, de control y de respuesta y las relaciones funcionales que se emplearán para simular su desarrollo. Asimismo, y como resultado de lo anterior, en esta etapa se señalan los datos necesarios para la construcción del modelo.

El tipo de información disponible para la construcción del simulador incide, por supuesto, fuertemente en la estructura de éste. En la mayoría de los estudios, la etapa de formulación tiene que ser reanalizada varias veces, debido a que la información disponible es insuficiente o a causa de una incorrecta especificación de las relaciones funcionales.

Una vez recopilados los datos necesarios, se procede a la construcción del modelo.

La tarea más importante a este nivel es determinar los parámetros de las relaciones funcionales involucradas en el simulador. En raras ocasiones estas relaciones son funciones o ecuaciones conocidas. Ca-

si siempre, para estimar el valor de estos parámetros, es necesario recurrir al análisis de regresión sobre la base de datos históricos reales. En este caso, la bondad del ajuste de los datos a la relación funcional es de importancia crucial.

El éxito o fracaso de un modelo de simulación está en gran parte determinado por la especificación de las relaciones funcionales y por la estimación de los valores de sus correspondientes parámetros.

Otra tarea contenida en esta etapa es la construcción de un programa de computación para el uso del simulador. Ella consiste en traducir el modelo a un lenguaje aceptado por el computador. Si bien esta es una tarea que en general demanda bastante tiempo, es relativamente simple de realizar, dado que las especificaciones del programa computacional están bien definidas por el modelo.

Validación es la etapa del proceso de simulación donde se verifica si el modelo se comporta de manera similar al sistema real. El propósito de esta etapa, no siempre alcanzado, es el mostrar que las infererencias obtenidas mediante la experimentación con el modelo son válidas.

Para la validación de un modelo es necesario analizar primero su consistencia interna y, después, comparar los resultados de el simulador con datos reales, usando métodos estadísticos apropiados.

Finalmente, las últimas etapas del proceso consisten en diseñar un conjunto de experimentos con el modelo para lograr los objetivos propuestos; ejecutar las simulaciones e interpretar los resultados obtenidos.

En la próxima sección, estos conceptos son aplicados a la simulación del crecimiento y producción de rodales forestales.

2.2 Modelo del sistema rodal y de su entorno

En un modelo de simulación del crecimiento y producción de madera en pie, el rodal es visto como un sistema, cuyo desarrollo está influenciado por su entorno ambiental y por las prácticas silviculturales sobre él aplicadas.

El Cuadro 3 muestra los componentes del sistema y de su entorno que son incluídos en el modelo. La línea doble indica el límite entre el sistema y su entorno.

El entorno es representado por variables de estado exógenas: calidad del sitio de crecimiento y edad del rodal; por variables de control: estado inicial del rodal y prácticas silviculturales; y por variables de respuesta: estadísticas de producción de madera.

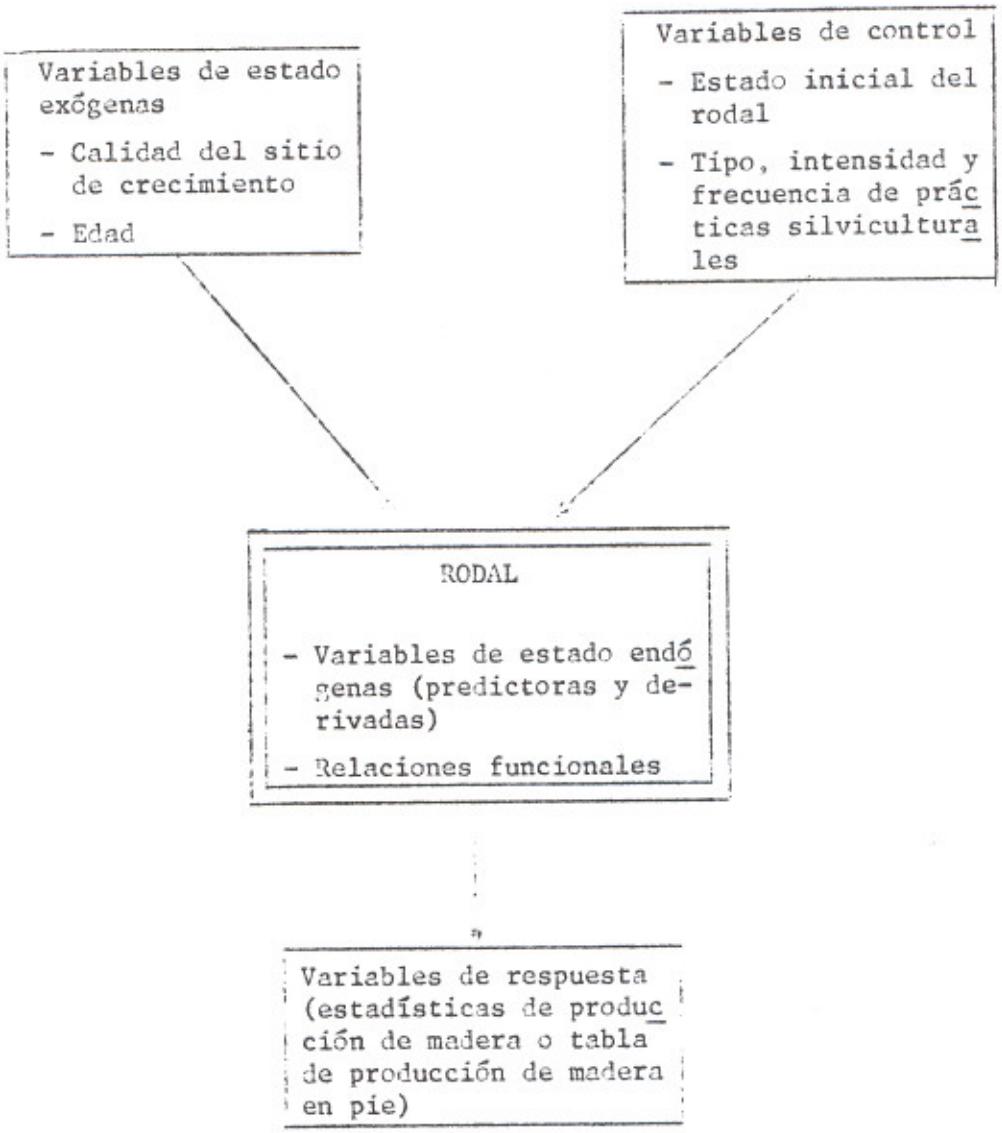
La información relativa a los valores que asumirán las variables de estado exógenas y las variables de control durante la simulación, forman parte de los datos de entrada que activan el simulador. Los valores alcanzados por las variables de respuesta, constituyen parte de los datos de salida del modelo de simulación.

La magnitud del crecimiento de un rodal es, en gran medida, dependiente de la calidad del sitio en que se encuentre.

La calidad del sitio, para una especie forestal determinada, varía de acuerdo a factores tales como: localidad geográfica (latitud, altitud, distancia a la costa, clima, geomorfología), propiedades del

suelo (textura, profundidad, drenaje, fertilidad) y vegetación natural.

CUADRO 3. Componentes de un modelo de simulación de rodal



Es evidente que la calidad del sitio debe ser evaluada de manera muy confiable y precisa, para que el modelo de crecimiento pueda entregar predicciones correctas de producción de madera. Es, sin embargo, imposible que todos los factores que modifican los atributos de un sitio puedan ser relacionados a variables cuantitativas en el modelo.

Con rarísimas excepciones, en los modelos de simulación de rodal, la calidad del sitio es evaluada a través de un indicador denominado "índice de sitio", definido como: la altura dominante (media aritmetica de la altura de un número de árboles seleccionados por un criterio prefijado) que alcanza el rodal a una edad de referencia determinada.

El índice de sitio es una variable exógena, tratada con mayor detalle en la sección 3.1.

Para activar el modelo de simulación es evidentemente indispensable entregar al simulador una descripción cuantitativa del estado inicial del rodal cuya evolución se desea predecir. Esta descripción debe incluir todos los valores iniciales de las variables de estado endógenas predictoras del rodal y ella se realiza a través de las denominadas variables de control.

Los modelos de simulación de plantaciones operan dentro de un intervalo determinado de edad de los rodales. Los límites de este intervalo dependen del rango de edad que cubre la información real usada para la construcción del simulador. No obstante, el límite inferior del intervalo varía, también, de acuerdo a la naturaleza de las variables endógenas consideradas en el modelo.

Así, comunmente, los simuladores pueden comenzar a operar sólo si la altura de cada uno de los árboles vivos del rodal a simular ha al-

canzado al menos 1,30 metros. Esto se debe a que importantes variables de estado endógenas del modelo (DAP; área basal) son definidas a esta altura, y, principalmente, a que existen muchas dificultades para el modelamiento del desarrollo de los rodales en sus primeros años de vida; donde, por ejemplo, la competencia de vegetación herbácea y arbustiva puede afectar notoriamente el desarrollo de los árboles.

Si la edad del rodal a simular se encuentra dentro del intervalo para las que opera el simulador, los valores iniciales de las variables dinámicas o predictoras se obtienen a partir de mediciones reales en terreno.

Pero, si el rodal a simular tiene una edad menor a aquella representada por el límite inferior del intervalo relevante; o bien, si el rodal no ha sido plantado aún 1/, es necesario estimar los valores que las variables predictoras tendrían al inicio de ese intervalo.

En este último caso, varios métodos pueden ser utilizados para generar el estado inicial del rodal. Un resumen de los principales de ellos se presenta en la sección 3.2.

Tal como se indica en el Cuadro 3, las variables de control además de caracterizar el estado inicial del rodal, especifican el tipo, intensidad y frecuencia de las prácticas silviculturales que se aplicarán sobre el rodal simulado. Generalmente, estas prácticas silviculturales se refieren a cortas intermedias o raleos 2/.

1/ Como sería el caso de querer predecir el crecimiento de rodales en terrenos de aptitud forestal actualmente desarbolados.

2/ Ver 2.3 ii).

El crecimiento del rodal es descrito mediante relaciones funcionales de transición, las cuales proyectan en el tiempo las variables predictoras empleadas en el modelo (tales como, número de árboles, área basal y altura dominante). Estas relaciones se denominan comunmente funciones de crecimiento y se construyen por análisis de regresión sobre datos históricos reales.

No todas las variables endógenas del modelo del rodal se proyectan mediante el uso de funciones de crecimiento. Usualmente, el volumen de madera de un rodal se obtiene al final de un intervalo de crecimiento, en función de variables predictoras (tales como, área basal total y altura dominante). Las variables cuyo comportamiento, para efectos del modelo, es independiente del tiempo se denominan derivadas y sus valores se obtienen empleando funciones de transformación, las que también son construídas en base a análisis de regresión sobre datos reales.

Los datos de salida del simulador lo forman estadísticas de producción de madera en pie, las que indican el estado del rodal, por unidad de superficie, en determinados puntos del tiempo simulado. El nivel de detalle de la información entregada por el simulador depende de las variables contempladas en el modelo del rodal, las que a su vez varían de acuerdo a los datos requeridos del simulador y de los datos disponibles para su construcción.

2.3 Clasificación de los modelos de simulación de rodal

Numerosos modelos matemáticos de simulación de rodales forestales se han desarrollado en el extranjero en la última década. El objeti-

vo común de ellos es estimar el crecimiento y producción futura de los bosques, generando información útil al manejo forestal.

La gran mayoría de los simuladores son aplicables a rodales coetáneos constituidos por una sola especie; lo que se explica no sólo porque estos bosques presentan un desarrollo más fácil de modelar que los disetáneos y mixtos, sino también porque el manejo de estos últimos es menos intensivo que el de los coetáneos monoespecíficos, al menos para fines de producción de madera.

Un gran porcentaje de estos modelos de simulación se refieren a bosques de regeneración natural. Esto es debido a que en la mayoría de los países donde simuladores de rodales han sido construidos, la restauración de los bosques después de su explotación ha sido hecha principalmente por regeneración natural, siendo las prácticas extensivas de plantación relativamente recientes en esos países. Una baja proporción de los modelos de simulación de rodales reportados en la literatura son aplicables a plantaciones.

Los modelos de simulación de rodal se pueden clasificar de acuerdo: i) al nivel de agregación de los componentes del rodal; ii) al tipo de práctica silvicultural considerada en el simulador, y; iii) al algoritmo empleado para la simulación de los raleos y corta final.

i) Nivel de agregación de los componentes del rodal

Los modelos varían según el grado de detalle empleado para la descripción del rodal.

De lo más general a lo más específico se pueden distinguir:

1. Modelos de simulación que sólo emplean variables de estado promedio o totales del rodal, tales como DAP promedio, área basal, altura dominante, número de árboles y volumen de madera por unidad de superficie. Lewis et al. (1976); Beekhuis (1966); Turner et al. (1977); Tasmanian Forestry Commission (1979); Myers (1968, 1973).

2. Simuladores que, en adición a emplear variables de estado promedio o totales del rodal, proyectan la distribución de frecuencias del DAP o tabla de rodal. Clutter y Allison (1974); Mc Mullan (1978); Stark (1979); Hall (1974); Alder (1978).

3. Modelos de simulación de árboles individuales. Stage (1973); Arney (1974); Lin (1974); Ek and Monserud (1974); Mitchell (1975).

De estas tres clases de modelos, los del último tipo son los que permiten una mayor flexibilidad para su uso y los que entregan una información más detallada de la evolución de un rodal.

Las desventajas asociadas a los modelos de simulación de árboles individuales son, sin embargos, serias. Ellos requieren un gran volumen de datos para ser construídos y necesitan de mucho tiempo de computador para ser ejecutados.

Por otro lado, en estos modelos es muy difícil especificar las relaciones funcionales de transición, las que por lo general deben ser estocásticas. El comportamiento de un árbol no puede ser adecuadamente predecido dado el estado del rodal, siendo necesario generar observaciones aleatorias desde una distribución de probabilidádes. Esto es así aún cuando se esté interesado en la evolución agregada del rodal, ya que la combinación de comportamientos promedios de los individuos puede dar un resultado completamente diferente al del comportamiento promedio del rodal.

Estas consideraciones hacen improbable que este tipo de simuladores puedan desarrollarse en Chile y, de hecho, ningún modelo de esta naturaleza ha sido reportado en el extranjero para pino insigne.

El análisis contenido en las secciones siguientes se realiza exclusivamente para los primeros dos tipos de modelos mencionados.

ii) Tipo de práctica silvicultural considerada en el simulador

Los modelos para la simulación de rodales asumen, con poquísimas excepciones, que los bosques crecen sin intervenciones silviculturales intermedias, o bien, con prácticas de raleo únicamente.

Muy recientemente y en la medida que se obtiene la información proveniente de experimentos en terreno, se ha intentado incorporar a los simuladores otras prácticas silviculturales, tales como fertilización y uso de plántulas genéticamente mejoradas. Turner et al. (1977).

Un problema importante de resolver en el futuro, tanto para la construcción de modelos de simulación como para la silvicultura en general, es el analizar si las interacciones entre prácticas culturales intensivas son de carácter aditivo o multiplicativo.

iii) Algoritmo empleado para la simulación de raleos y corta final

En cuanto a este aspecto, los simuladores se pueden clasificar en dos grupos.

Aquellos en los que la intensidad y frecuencia de los raleos y edad de la cosecha final a aplicar sobre el modelo de rodal son determinadas por el usuario del simulador a través de los datos de entrada que activan la simulación; y aquellos en los que se ha incorporado al modelo un criterio bajo el cual se realizan las cortas en forma automática.

En el primer caso el algoritmo de cortas es externo al modelo. En el segundo caso, el algoritmo es parte integrante del modelo y la aplicación de éste es conducida a optimizar o satisfacer algún criterio determinado.

En el próximo capítulo se analizan sólo los modelos de simulación correspondientes al primer caso, dejando para el capítulo 5 los modelos optimizadores.

3. VARIABLES Y RELACIONES FUNCIONALES EN LOS MODELOS DE SIMULACION DE RODALES FORESTALES

En el presente capítulo se analizan aquellos simuladores de rodales reportados en la literatura, relevantes a la construcción de modelos de simulación de las plantaciones de pino insigne en Chile. El análisis se concentra en la estructura de estos simuladores y, como es obvio, especial atención reciben aquellos implementados para esta especie, principalmente en Australia y Nueva Zelandia.

En las primeras tres secciones de este capítulo se presentan las variables de estado, de control y de respuesta que emplean los simuladores analizados y se citan las relaciones funcionales más importantes que describen al comportamiento de estas variables en el modelo de rodal.

En la última sección se exponen los diagramas de flujo para tres simuladores de pino insigne representativos, construídos en el extranjero.

3.1 Variables de estado

Las variables de estado caracterizan la condición en que se encuentra un rodal y su entorno en un punto del tiempo.

En el Cuadro 4 se muestran las variables de estado que usualmente se consideran en los modelos de simulación de rodales. No se debe inferir que cada modelo emplea todas las variables de estado mencionadas, sino que un subconjunto de ellas.

CUADRO 4. Variables de estado usualmente utilizadas por los modelos de simulación de rodales coetáneos monoespecíficos

		Simuladores que emplean únicamente variables de estado agregadas	Simuladores que además emplean variables de estado por clase de DAP
EXOGENAS		Indice de sitio	Indice de sitio
		Area basal máxima 1/	Area basal máxima
ENDOGENAS	PREDICTORAS	Altura dominante	Altura dominante
		Area basal	Area basal
		Número de árboles	Número de árboles por clase de DAP
		DAP promedio	DAP promedio de la clase.
	DERIVADAS	DAP promedio 2/	DAP promedio de la clase 2/
		Volumen total de madera	Altura promedio de la clase de DAP
		Clasificación del volumen de madera 3/	Volumen promedio de la clase de DAP
			Clasificaicón del volumen de madera 3/

1/ Máxima área basal por unidad de superficie que un rodal puede sustentar.

2/ Esta variable de estado puede ser predictora o derivada.

3/ De acuerdo a su destino o utilización y/o dimensiones de las trozas.

3.1.1 Variables de estado exógenas

Indice de Sitio (S)

En la sección 2.2 se expresó que la calidad del sitio de crecimiento de un rodal se evalúa mediante un indicador denominado "índice de sitio".

Numerosos estudios indican que el índice de sitio es una medida eficiente de la calidad del sitio para ser empleado en modelos de crecimiento (Hagglund, 1978) y, de hecho, la gran mayoría de los simuladores descritos en la literatura utilizan este indicador. Otros, predicen el desarrollo de rodales para estratos o tipos de sitio preestablecidos (Clutter y Allison, 1974) y, por lo tanto, para condiciones muy limitadas en extensión geográfica; y, finalmente, otros simuladores incorporan algunos factores del sitio (tales como: altitud, precipitación media anual) en variables independientes del modelo (Stage, 1973). Estos últimos son modelos bastante complejos que, por lo general, simulan el crecimiento de los árboles individuales de un rodal.

El índice de sitio, al ser empleado como variable de estado exógena, refleja la calidad normal del sitio, expresando la altura dominante que alcanzaría el rodal, a una edad preestablecida, en condiciones no alteradas por efectos incontrolables (tiempo meteorológico, impactos de agentes destructores) o por prácticas silviculturales que modifiquen esa altura dominante.

Las "curvas de índice de sitio" muestran las relaciones entre la edad del rodal y su altura dominante, para diferentes niveles de calidades de sitio. Estas curvas o relaciones funcionales son utiliza

das para evaluar la calidad del sitio en rodales que no han alcanzado la edad de referencia a la cual se determina el índice de sitio. Por otra parte, para estimar la calidad del sitio en parcelas deforestadas con la especie de interés, o bien, cubiertas por rodales en condiciones alteradas, se deben establecer relaciones entre factores del sitio e índices de sitio.

La información requerida para la construcción de índices de sitio se obtiene de preferencia de parcelas permanentes o a través de análisis de tallo de árboles dominantes 1/.

Las metodologías propuestas para la construcción de curvas de índice de sitio se exponen en la literatura especializada (Bailey y Clutter, 1974; Franz y Rawat, 1974; Hagglund, 1978).

Area basal máxima (GMAX)

El área basal máxima es la mayor superficie, expresada generalmente en metros cuadrados, de la sección transversal de todos los árboles, a la altura de 1,3 m, que puede sustentar un rodal en un punto del tiempo.

Esta variable de estado exógena es utilizada en algunos simuladores (Turner et al., 1977; Alder, 1978; Tasmanian Forestry Commission, 1979) para los propósitos de:

1/ En este último caso no es seguro que estos árboles hayan sido dominantes a través de toda la vida del rodal, lo que ocasionaría un sesgo en la estimación.

a) establecer un indicador de la densidad de rodal; el que generalmente es expresado como G/GMAX o como (1 - G/GMAX), donde G es el área basal del rodal al tiempo t y GMAX es la correspondiente área basal máxima al tiempo t; y

b) predecir la mortalidad debida a la competencia por luz y nutrientes de los árboles de un rodal. En este caso, los modelos asumen que este tipo de mortalidad ocurre cuando G alcanza el valor de GMAX.

Turner et al., Alder y The Tasmanian Forestry Commission establecen para pino insigne que GMAX es función de la altura dominante del rodal (HDOM). Los dos últimos autores citan que

$$GMAX = k_1 \ (1 - \exp \{k_2 \ HDOM\})^{k_3}$$

es la forma de la relación funcional que mejor se ajusta a los datos.

La información requerida para estimar GMAX se obtiene de la curva envolvente de los datos de área basal, provenientes de parcelas permanentes y/o temporales de densidad completa.

3.1.2 Variables de estado endógenas

Estas variables definen el estado del sistema rodal en un punto del tiempo. Para su análisis es conveniente separarlas en dos grupos: las variables de estado endógenas agregadas y las variables de estado por clase de DAP. Las primeras, son variables totales o promedios del rodal, mientras que las últimas se refieren al estado de cada una de las clases diamétricas.

La simbología utilizada en esta sección, es la siguiente:

$HDOM_t$ = altura dominante del rodal en el año t (m)
$IHDOM_t$ = incremento de la altura dominante entre t y t + 1 (m)
S = índice de sitio (HDOM a una edad de referencia) (m)
E_t = edad del rodal en el año t (años)
N_t = número de árboles, por hectárea, del rodal en el año t.
M_n = mortalidad, expresada en número de árboles por hectárea
G_t = área basal en el año t (m^2/ha)
IGN_t = incremento neto en área basal entre t y t + 1 (m^2/ha año)
IGB_t = incremento bruto en área basal entre t y t + 1 (m^2/ha año)
M_{gt} = mortalidad, expresada en área basal por hectárea entre t y t + 1 (m^2/ha año)
D_t = DAP medio aritmético, por hectárea, del rodal en el año t (cm)
D_{ct} = DAP del árbol de área basal media, por hectárea, del rodal en el año t (cm)
H_t = altura media de todos los árboles del rodal (m)
V_t = volumen total de madera en pie, en el año t (m^3/ha)
k_j = constantes, $\forall_j$
exp = base e
L_n = logaritmo en base e
log = logaritmo en base 10

(Cuando el subscrito t se reemplaza por 1 o por 2, significa al comienzo o al final del intervalo de crecimiento, respectivamente. Esta notación se emplea sólo cuando el intervalo de crecimiento es distinto de un año).

3.1.2.1 Variables de estado endógenas agregadas. Existen modelos de simulación que sólo emplean este tipo de variables. Usualmente, los modelos de simulación de rodales de pino insigne que usan variables agregadas tienen como variables predictoras: la altura dominante y el área basal (y menos frecuentemente el número de árboles), obteniendo el volumen de madera del rodal simulado como variable derivada de las anteriores.

Altura dominante (HDOM)

Varias razones justifican el uso de HDOM como variable predictora. Primero, HDOM no es afectada, dentro de un rango amplio, por la densidad del rodal y, como corolario de lo anterior, no es influenciada de forma significativa por los raleos sistemáticos ni por las cortas intermedias por lo bajo, lo que hace que su crecimiento sea independiente de estas prácticas silviculturales. Este hecho ofrece una ventaja evidente para construir un modelo de rodal que considere este tipo de raleos, pues no se introduce una variabilidad adicional en la función de transición que proyecta esta altura.

Segundo, las relaciones funcionales empleadas para proyectar HDOM son, generalmente, las mismas utilizadas para determinar las curvas de índice de sitio.

Tercero, HDOM es una variable que, junto al área basal total, permite obtener una buena estimación del volumen de madera existente en el rodal (Beekhuis, 1966; Turner et al., 1977; Tasmanian Forestry Commission, 1979).

Para que la estimación de HDOM sea objetiva es necesario definir a esta variable explícitamente. Los criterios actualmente adoptados son:

- HDOM es la media aritmética de la altura de los n árboles más altos del rodal, donde n es una constante que varía entre 40 y 100 por hectárea dependiendo del autor (Beekhuis, 1966; Hall, 1974; Lewis et al., 1976; Mc Mullan, 1978; Tasmanian Forestry Commission, 1979; Stark, 1979).

- HDOM es la media aritmética de la altura de los n árboles de mayor DAP del rodal; donde n es una constante entre 40 y 100 por hectárea (Hagglund, 1978; Alder, 1978).

Para un número n igual de árboles, los dos criterios no difieren significativamente por la alta correlación positiva que existe entre la altura y DAP. No obstante, el primero de ellos es más adecuado ya que no implica la medición adicional en terreno del DAP de los individuos.

La forma de las relaciones funcionales de transición de HDOM, en algunos simuladores relevantes, se presenta a continuación.

Hall (1974); Pinus radiata:

$$HDOM_t = k_0 + k_1 S + k_2 L_n E_t$$

Alder (1978); Pinus radiata:

$$HDOM_t = \exp (k_0 + k_1/E_t + (k_2 + k_3/E_t) \cdot (L_n S - k_4)/k_5)$$

Turner et al. (1977); Pinus radiata:

$$HDOM_t = (L_n (k_1 E_t^{k_2} + 1) \cdot HDOM_{t-1})/(L_n (k_1 E_{t-1}^{k_2} + 1))$$

Hardie (1977); Pinus taeda:

$$HDOM_t = ((k_0 + k_1 S) (1 - \exp (k_2 + k_3 S) E_t))^{k_4}$$

Rustagi y Díaz (1976); Pseudotsuga menziesii:

$$HDOM_t = k_0 + E_t^2 ((k_1 + k_2)(E_t + k_3)\ E_t^2)$$

k_1, k_2, k_3 en función de S

Goldsmith (1976), Pinus strobus:

$$\sqrt{HDOM_t} = k_0 + k_1\ E_t + k_2\ E_t^2 + \sqrt{S}$$

Clutter y Belcher (1978); Pinus elliottii:

$$L_n\ HDOM_t = k_0 + k_1/E_t + \exp\ (k_2\ (1/E_t - k_3)(L_nS - k_4)$$

Pelz (1974); Pseudotsuga menziesii:

$$\frac{HDOM_t - HDOM_{t-1}}{HDOM_{t-1}} = k_0 + k_1/HDOM_{t-1} + k_2\ E_t + k_2/E_t + k_4/S$$

Area basal por hectárea (G)

El área basal por hectárea es una importante variable de estado endógena predictora en modelos de simulación. G es un buen indicador de la densidad del rodal, ya que su magnitud está correlacionada con el número y tamaño de los árboles. Además, junto a HDOM, G permite la estimación del volumen total de madera existente en un rodal.

Resultados de numerosos estudios indican que el incremento en área basal por hectárea (IG) está fuertemente correlacionado con G mismo. Para un sitio de crecimiento dado, IG es creciente con respecto a la edad de la plantación, hasta que sobre cierto nivel de

G el espacio de crecimiento de los individuos se reduce e IG comienza a decrecer.

Para proyectar IG en el tiempo se puede recurrir a dos procedimientos alternativos: considerar el incremento neto en área basal (es decir, el IG de aquellos árboles vivos del rodal) o considerar el incremento bruto en área basal (es decir, el IG de los árboles vivos del rodal más el IG de los árboles que mueren en el intervalo de tiempo considerado). El primer procedimiento es adecuado cuando la mortalidad arbórea sigue un comportamiento consistente. Pero, si la mortalidad es irregular conviene adoptar el segundo procedimiento y desarrollar relaciones funcionales separadas, una para el incremento bruto en área basal y otra para la mortalidad en términos de área basal.

Las relaciones funcionales para la proyección de IG, usadas en simuladores relevantes, se presentan a continuación.

Jackson y Uve (1964); Pinus radiata:

$$IGN_t = k_0 + k_1 N_t + k_2 HDOM_t$$

Turner et al. (1977); Pinus radiata:

$$IGN_t = \exp (k_0 + k_1/G_t + k_2 G_t + k_3 (E_t + E_{t+1}) + k_4 S)$$

Clutter y Allison (1974); Pinus radiata:

$$IGB_t = \exp (k_1/G_t + k_2 E_t^{k_3}); \text{ y}$$

$$M_{gt} = k_1 D_t^2 (N_t - N_{t+1})$$

Hall (1974); Pinus radiata:

$$G_{t+1} = k_0 + k_1 L_n G_t + k_2 E_t + k_3 E_{t+1} + k_4/E_t + k_5 L_n E_t + k_6 L_n E_{t+1} + k_7 S + k_8 \delta_t + k_9 L_n \delta_t$$

donde: δ_t = índice de densidad de Reineke = $F(N_t, D_t)$

Stark (1979); Pinus radiata:

IGN_t = valor obtenido de relaciones gráficas en función de G_t, E_t y S.

Clutter (1963); Pinus taeda:

$$IGN_t = G_t \ (L_n G_t)/E_t + k_1/E_t + k_2 G_t S/E_t$$

Sullivan y Clutter (1972). Pinus taeda:

$$G_{t+1} = \exp \ (E_t/E_{t+1} \ (L_n G_t) + k_1 \ (1 - E_t/E_{t+1}) + k_1 \ (1 - SE_t/E_{t+1}))$$

Los autores mencionados asumen que el incremento en área basal es independiente de la existencia de raleos; es decir, que G_t puede representar tanto el área basal resultante del desarrollo natural del bosque como el área basal que queda en pie después del raleo.

No es evidente que el incremento del área basal de un rodal inmediatamente después de un raleo sea igual al de otro rodal que, con la misma área basal, no haya sido raleado. El crecimiento para el período después del raleo puede ser diferente, ya que los árboles deben adaptarse a las nuevas condiciones del medio.

Para tener en cuenta esta adaptación de los rodales a las nuevas condiciones de competencia que resultan después de un raleo, se han planteado varias soluciones.

Beekhuis (1966), para pino insigne, considera el incremento bruto del área basal para el intervalo entre dos raleos consecutivos ($IGB_{1,2}$), evitando así predecir en forma explícita el incremento anual del área basal inmediatamente después del raleo:

$$IGB_{1,2} = IHDOM_{1,2}\ (G_1 + k_0)/(HDOM_1 + k_1);\ y$$

$$M_{g1,2} = k_1\ D_1^2\ (N_1 - N_2)$$

Mc Mullan (1978) emplea también, en un simulador de rodales de pino insigne, una relación funcional para predecir el área basal al final del intervalo entre dos raleos consecutivos, pero introduce además como variable explicatoria la proporción del área basal extraída en el último raleo. La forma de la función es:

$$L_n G_2 = \alpha_1\ L_n\ G_1 + k_1\ \alpha_2 + k_2\ \alpha_2\ S + k_3\ \alpha_2\ (P/(1 + (E_2 - E_1))$$

donde: $\alpha_1 = E_1/E_2$

$\alpha_2 = 1 - E_1/E_2$

P = proporción del área basal extraída en el último raleo; si no existe raleo previo P = 0.

Grut (1970) propone para pino insigne la siguiente relación funcional:

$$IGN_t = k_0 + k_1\ E_t^2 + k_2\ H_t/E_t + k_3\ R + k_4 L_n N_t + k_5 L_n\ (N_t \cdot H_t)$$

donde: R = variable ϵ {-2,5}, cuyo valor depende de los años transcurridos después del raloe.

Por otra parte, Tasmanian Forestry Commission (1979) utiliza para simular el crecimiento de rodales de pino insigne, tres relaciones funcionales diferentes para explicar el incremento anual del área basal neta:

a) $IGN_t = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2\ HDOM_t^2 + k_3 G_t + k_4 G_t^2 + k_5\ \sqrt{G_t} + k_6/S + k_7 E_t + k_8 E_t^2 + k_9 D_{ct}/E_t$

b) $IGN_t/G_t = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2 HDOM_t^2 + k_3/HDOM_t + k_4 S + k_5 S^2 + k_6 G_t + k_7 X_1 + k_8 X_2$

c) $IGN_t = k_0 + k_1 G_t + k_2\ G_t^2 + k_3\ \sqrt{G_t} + k_4/HDOM + k_5 Y + k_6 X_3 + k_7/S$

donde: a) es válida para rodales no raleados, b) se emplea para calcular IGN_t en el año inmediatamente después del raleo y c) se usa para calcular IGN_t después de un año de raleo. X_1, X_2 y X_3 son variables cuyo valor depende del número de veces que se ha raleado el rodal e Y es el número de años desde el último raleo.

Número de árboles por hectárea (N)

En el proceso de simular el crecimiento de rodales forestales, es importante predecir el número de individuos que componen el rodal al final de cada intervalo de tiempo simulado. Esto permite estimar en cuantos árboles está distribuído el área basal o volumen de madera del rodal y, de este modo, tener una apreciación del tamaño de los individuos y de los volúmenes disponibles para usos o destinos alternativos de la madera en pie

La reducción no controlada del número de árboles por hectárea en el transcurso del tiempo puede deberse a dos tipos de mortalidad. La mortalidad natural, debida a la competencia por luz y nutrientes, y la mortalidad causada por agentes destructores del bosque como insectos, hongos, fuego, viento. En este estudio se considera sólo la mortalidad natural.

La forma en que la mortalidad natural es tratada en los simuladores de pino insigne analizados se presenta a continuación.

Beekhuis (1966) deriva una relación gráfica, que denomina "tendencia de la mortalidad normal" y la cual expresa el número esperado de árboles vivos por hectárea en función de la altura dominante del rodal y del espaciamiento relativo entre árboles (distancia promedio entre los individuos, expresada como porcentaje de la altura dominante del rodal).

Turner et al. (1977) asume que la mortalidad natural ocurre cuando el rodal alcanza el área basal máxima que pueda sustentar, la que a su vez, como se indicó en 3.1.1, es expresada en función de la altura dominante. Si G_{t+1} proyectada supera a $GMAX_{t+1}$, el número de árboles vivos (N_{t+1}) es reducido a:

$$N_{t+1} = k_1 N_t G_{t+1}/GMAX_{t+1} + k_2 E$$

Ferguson and Leech (1976), proponen la siguiente ecuación para rodales no intervenidos:

$$L_nN_2 = L_nN_1 - k_1p$$

donde: p es el número de años del intervalo de crecimiento.

Clutter y Allison (1974) desarrollan una relación funcional para describir las tendencias observadas de la mortalidad natural anual, de la forma:

$$N_{t+1} = N_t^{(E_t/E_{t+1})^{k_1 E_t}}$$

los autores indican que esta relación es aplicable a sitios y rango de edades muy restringidos.

Grut (1970), Lewis et al. (1976), Tasmanian Forestry Commission (1979), Mc Mullan (1978), Stark (1979), Alder (1978) y Hall (1974), no consideran en los simuladores de pino insigne funciones de transición para el número de árboles por hectárea. En algunos de estos simuladores, la mortalidad natural es implícitamente tomada en cuenta al proyectar el área basal neta del rodal y, en otros, la mortalidad se considera despreciable, dada la intensidad y frecuencia de los raleos que se aplican sobre los modelos de simulación de los rodales.

Relaciones matemáticas para describir la mortalidad natural, usados en simuladores de rodales coetáneos de otras coníferas, son de la forma:

Lee (1971); Pinus contorta:

$$N_2 = N_1 (1 + m)^p$$

donde: p es el número de años del intervalo de tiempo para el que la mortalidad es descrita y m es la tasa de mortalidad, calculada separadamente como función de E_1, D_1 o ambos.

Stiell (1974); Pinus resinosa y Picea glauca:

$$M_n = k_0 + k_1 N_1 \cdot HDOM + k_2 (N_1 \cdot HDOM)^2$$

donde: M_n es el número de árboles que mueren por cada 3 m de incremento en HDOM.

Rustagi y Díaz (1976); Pseudotsuga menziesii:

$$N_2 = N_1 \qquad \text{si} \qquad I \leq 0.8$$

$$N_2 = N_1 (k_0 + k_1 E_2/E_1) \qquad \text{si} \qquad 0.8 < I < 1.2$$

$$N_2 = N_1 (k_0 + k_1 E_2/E_1)/I \qquad \text{si} \qquad I \geq 1.2$$

donde: $I = G_2/GMAX_2$

Myers (1973): Pinus ponderosa:

$$N_2 = N_1 \qquad \text{si } D_t > 25 \text{ cm}$$

$$(N_2-N_1)/N_1 = k_0 + k_1 D_1 + k_2 D_{c1}^2 + k_3 S^2 + k_4 G_1 D_{c1} \qquad \text{si } D_t \leq 25 \text{ cm}$$

Pelz (1974); Pseudotsuga menziesii:

$$N_2 = k_0 + k_1 N_1 + k_2 N_1^2 + k_3 S \qquad \text{si } 30 < E_2 \leq 35 \text{ (años)}$$

$$N_2 = k_4 + k_5 N_1 + k_6/N_t + k_7 S + k_8 E_1 \qquad \text{si } E_2 > 35 \text{ (años)}$$

En general, el comportamiento de la mortalidad natural es extremadamente variable y difícil de modelar.

DAP promedio del rodal (D_c)

La mayoría de los modelos de simulación de rodal proyectan, en tiempo simulado, el área basal y el número de árboles por hectárea. A partir de estas dos variables de estado se puede calcular fácilmente el DAP que corresponde al árbol de área basal media:

$$D_{ct} = \frac{200}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{G_t}{N_t}} \quad 1/$$

En algunos modelos, sin embargo, D_{ct} es proyectado en el tiempo en reemplazo de una de las dos variables de estado mencionadas.

Tasmanian Forestry Commission (1979) desarrolla, en adición a funciones de crecimiento del área basal, un conjunto de relaciones funcionales de transición para D_{ct}, en pino insigne:

a) $$\frac{D_{ct+1} - D_{ct}}{D_{ct}} = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2/HDOM_t + k_3 G_t + k_4 G_t^2 + k_5 G_t^3 + k_6/G_t + k_7 S + k_8/S + k_9 D_{ct}/E_t + k_{10} E_t/D_{ct}$$

b) $$D_{ct+1} - D_{ct} = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2 HDOM_t^2 + k_3 HDOM_t^3 + k_4 D_{ct}/E_t + k_5 S + k_6/S + k_7/G + k_8 X_1 + k_9 X_2$$

c) $$D_{ct+1} - D_{ct} = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2 HDOM_t^2 + k_3 HDOM_t^3 + k_4 D_{ct}/E_t + k_5 Y + k_6/G_t + k_7 G_t + k_8 X_3$$

1/ El valor de D_{ct} es siempre mayor o igual que el DAP promedio aritmético del rodal (D_t).

donde: a) es válida para rodales no raleados, b) se emplea para calcular D_{ct+1} en el año inmediatamente después del raleo y c) se usa para calcular D_{ct+1} después de un año del raleo. X_1, X_2 y X_3 son variables cuyo valor depende del número de veces que se ha raleado el rodal e Y es el número de años desde el último raleo.

Myers (1973) establece la siguiente relación para Pinus ponderosa y Pinus contorta:

$$D_{c2} - D_{c1} = k_1 + k_1 D_{c1} + k_2 S + k_3 G_1$$

Pelz (1974) establece para Pseudotsuga menziesii:

$$(D_{c2}-D_{c1})/D_{c1} = k_0 + k_1 D_{c1} + k_2 D_{c1}^2 + k_3 E_1 + k_4 S$$

Madrigal (1975) desarrolla una relación funcional de transformación para estimar D_{ct} a partir del número de árboles y de la altura dominante en rodales de Pinus radiata:

$$D_{ct} = k_0 + k_1/\sqrt{N_t} + k_2 HDOM_t$$

Es necesario destacar que, en general, la proyección del DAP promedio aritmético del rodal (D_t) no se emplea en simuladores que usan variables de estado agregadas. Esto se debe a que el comportamiento de D_t en el tiempo es difícil de modelar y está sujeto a cambios complejos como resultado de la aplicación de raleos.

Volumen de madera por hectárea

El volumen de madera en pie, por hectárea, es uno de los componentes principales de la información que genera un modelo de simulación de rodales forestales. Este volumen es generalmente expresado en metros cúbicos, el que puede, si existen datos adecuados, ser desagregado de acuerdo al tipo o dimensiones del producto que se desea obtener del bosque.

Típicamente, el volumen de madera de un rodal simulado es estimado, al final de cada intervalo de crecimiento, en función de otras variables de estado del rodal, usando relaciones funcionales de transformación.

La proyección directa del volumen de madera en el tiempo es inconveniente, pues implica la estimación de esta variable en los rodales cuyo crecimiento se desea simular y porque el comportamiento del volumen en el tiempo, junto a sus cambios en relación a prácticas silviculturales intermedias, es mejor explicado a través de variables de estado del rodal más fáciles de cuantificar y de predecir.

Las siguientes relaciones funcionales de transformación han sido empleadas para estimar el volumen total de madera en pie en rodales de pino insigne:

Beekhuis (1966):

$$V_t/G_t = k_0 + k_1 HDOM_t$$

Grut (1970):

$$V_t = k_0 + k_1 G_t H_t$$

Turner et al. (1977):

$$V_t = k_0 + k_1 G_t + k_2 HDOM_t + k_3 G_t HDOM_t + k_4 S$$

Hall (1974):

$$V_t = k_0 + k_1 D_t + k_2 HDOM_t + k_3 N_t + k_4 HDOM_t \cdot G_t + k_5 \log HDOM_t + k_6 \sqrt{E_t} + k_7 H_t$$

Tasmanian Forestry Commission (1979):

$$V_t/G_t = k_0 + k_1 HDOM_t + k_2 HDOM_t^2 + k_3/HDOM_t + k_4 G_t/GMAX_t$$

(para rodales no raleados); y

$$V_t/G_t = k_5 + k_6 HDOM_t + k_7 HDOM_t^2 + k_8 HDOM_t^3 + k_9/HDOM_t + k_{10} Y + k_{11} X_1 + k_{12} X_2$$

(para rodales raleados)

donde: Y representa el número de años desde el último raleo y X_1, X_2 dependen del número de veces que el rodal ha sido raleado.

Beekhuis (1966), Lewis et al. (1976) y Tasmania Forestry Commission (1979) proponen procedimientos para desagregar o subdividir el volumen total de madera en pie del rodal, de acuerdo a ciertos diámetros límites en el fuste.

Sea V_{dt} el volumen de madera en pie del rodal distribuído en trozos de un diámetro menor o igual a d, en el año t (m^3/ha).

Beckhuis elabora una tabla numérica que expresa (V_{dt}/V_t) en función del DAP del árbol de área basal media; y Lewis et al. expresa esa misma relación, en función del volumen promedio por árbol. 1/.

The Tasmanian Forestry Commission, por otra parte, desarrolla para cada d una relación funcional de transformación de la forma: $V_{dt}/V_t = F_1(HDOM_t; D_{ct})$ para rodales en pie antes del raleo (si lo hubiere) y $V_{dt}/V_t = F_2(HDOM_t, d_{rct})$ 2/ para el producto del raleo.

3.1.2.2 Variables de estado por clase de DAP. Existen simuladores que, en adición a emplear variables de estado totales o promedios del rodal, proyectan la distribución de frecuencia del DAP o "tabla de rodal".

Obviamente, la información que generan estos simuladores es más detallada que la entregada por aquellos que sólo usan variables agregadas. Pero, la cantidad y calidad de la información requerida para proyectar variables de estado por clase de DAP es evidentemente más alta.

La predicción del comportamiento de la tabla de rodal en el tiempo es realizada en los simuladores a través de tres métodos alternativos:

1/ De acuerdo a los autores estas tablas numéricas son aplicables tanto al volumen de madera del rodal en pie como al volumen de madera extraído de un raleo.

2/ d_{rct} = DAP correspondiente al árbol de área basal media extraído en el raleo.

Método 1:

Conocida una tabla de rodal al inicio de cada intervalo de crecimiento simulado,

a) se estima el número total de árboles, por hectárea, que mueren en ese intervalo, usando una relación funcional de mortalidad;

b) se distribuye esa mortalidad en cada una de las clases de DAP, siguiendo un algoritmo construído en base a la tendencia histórica observada;

c) se estima, a partir de una relación funcional de transición, el incremento total del área basal neta del rodal por hectárea para el intervalo relevante; y

d) este incremento se distribuye en cada una de las clases de DAP, de acuerdo a relaciones matemáticas de transformación.

Se obtiene así una nueva tabla de rodal al final del período de crecimiento; lo cual se repite para cada intervalo en el que se ha subdividido el tiempo total de simulación.

En modelos de simulación de rodales de pino insigne, Clutter y Allison (1974), Mc Mullan (1978) y Stark (1979) adoptan este procedimiento.

Método 2:

La proyección de la tabla de rodal es efectuada, para cada intervalo de crecimiento y para clase de DAP; considerando a cada una de estas clases como variable predictora.

Hall (1974) y Alder (1978) emplean este método en simuladores de rodales de pino insigne.

Hall usa una función de transición de la forma:

$$DAP_{it+1} = F\ (DAP_{it},\ N_t,\ E_t,\ E_{t+1},\ S,\ \delta)$$

donde: DAP_{it} = DAP promedio de la clase i en el año t (el tamaño de la clase de DAP es de una pulgada) y δ = índice de densidad de Reineke.

Alder, describe la distribución de frecuencia del DAP mediante un vector de diez números reales SV(i), i = 1, ... 10, donde cada elemento del vector representa el valor del DAP para el cual existe una probabilidad de (i - 1)/10 + 0,05 de que cualquier árbol del rodal tenga un DAP menor. El incremento anual de cada elemento de SV(i), ISV(i), es calculado usando una relación matemática de transición de la forma:

$$ISV(i) = F(HDOM_t,\ SV(i),\ D_t,\ G_t,\ GMAX_t)$$

Los dos autores no consideran mortalidad natural, pues practican raleos sobre el rodal simulado.

Método 3:

La tabla de rodal es descrita mediante una distribución de frecuencias de probabilidades del DAP de los árboles, con los parámetros de la distribución expresados en función de variables de estado del rodal.

Las distribuciones de probabilidades usualmente utilizadas son la beta, gamma y Weibull.

El método, con la excepción de utilizarse para caracterizar el estado inicial del rodal a simular (Clutter y Allison, 1974; Alder, 1978), no ha sido empleado en simuladores de rodales de pino insigne.

Clutter y Bennett (1965), Burkhart y Strub (1974), Hardie (1977) y, Smalley y Bailey (1974), entre otros, usan este método para otras especies. Smalley y Bailey lo aplican a plantaciones no manejados de Pinus taeda, representando la distribución del número de árboles por DAP a través de la función Weibull:

$$f(DAP) = (c/b)((DAP - a)/b)^{c-1} \exp - ((DAP - a)/b)^{c}$$

donde los parámetros a, b y c de esta distribución en el año t son función de la altura dominante, edad y número de árboles del rodal:

$$a_t = k_0 + k_1 HDOM_t$$

$$a_t + b_t = k_2 + k_3 N_t + k_4 \log HDOM_t + k_5/N_t$$

$$c_t = k_6 + k_7 E_t + k_8 \log N_t$$

Mc Gee y Della Bianca (1967), Lenhart (1968), Lenhart y Clutter (1971), y Rustagi (1978) usan la distribución del área basal total por clase de DAP, en vez de la del número de árboles por clase de DAP.

El método 3 tiene reducida aplicación al caso de la simulación de rodales raleados, debido a las muy variadas formas que la distri

bución del número de árboles o área basal puede asumir después del raleo.

Cualquiera sea el método de proyección de la tabla de rodal, es necesario estimar el volumen de madera del árbol medio de cada clase de DAP. Para ello,

Sea, V_i = volumen de madera del árbol medio de la clase de DAP i (m^3).

DAP_i = DAP promedio de la clase i (cm).

h_i = altura media total de los árboles de la clase i (m).

V_i puede obtenerse directamente en función del DAP_i y de variables de estado agregadas del rodal. Lewis et al. (1976) proponen una relación funcional de la forma $V_i = f(DAP_i, HDOM)$ y Mc Mullan (1978) establece otra de la forma $V_i = f(DAP_i, HDOM, E)$.

Alternativamente, se puede estimar V_i en función de DAP_i y h_i usando una ecuación de volumen para árboles individuales. Previamente, se requiere conocer h_i. Alder (1978) emplea una relación matemática $h_i = f(DAP_i, HDOM)$; Hall (1974) propone $h_i = f(DAP_i, HDOM, E)$; y según Clutter y Allison (1974) $h_i = f(DAP_i, E, N)$.

El volumen de madera del árbol medio, desde la base utilizable hasta un diámetro límite dado, puede ser estimado a través de una relación funcional de ahusamiento, o bien, a través de ecuaciones que determinan la proporción del volumen total del árbol que existe entre la altura del tocón y el diámetro límite especificado (Hall, 1974; Alder, 1978; Mc Mullan, 1978).

El volumen total de madera por hectárea de un rodal se obtiene por simple agregación de los volúmenes por clase de DAP.

3.2 Variables de control

Para activar un modelo de simulación de rodal es necesario entregar al simulador una descripción cuantitativa, tanto del estado inicial del rodal cuya evolución se desea predecir, como del tipo, frecuencia e intensidad de las prácticas silviculturales que se van a efectuar sobre el rodal simulado. Estas descripciones se realizan a través de las denominadas variables de control.

El estado inicial del rodal queda completamente caracterizado al especificar el valor que asume cada una de las variables de estado exógenas y predictoras empleadas por el simulador para proyectar el rodal en tiempo simulado. El estado inicial de las variables derivadas es calculado internamente por el modelo a través de las funciones de transformación.

Si la edad del rodal a simular está comprendida dentro del intervalo de edades para las que opera el simulador, los valores iniciales de las variables predictoras se obtienen de mediciones reales en terreno, o bien, se extraen de la información entregada por un inventario reciente de las plantaciones.

Si el rodal no ha alcanzado la edad inferior del intervalo, se requiere estimar los valores que las variables de estado exógenas y predictoas tendrían al inicio de ese intervalo. El Cuadro 5 presenta algunos métodos empleados con este propósito en modelos de simulación de rodales de pino insigne.

CUADRO 5. Métodos empleados para estimar el valor inicial de las variables de estado predictoras del rodal en simuladores de pino insigne 1/

VARIABLE PREDICTORA	METODO
- Número inicial de árboles (N_0)	- En base a datos históricos o hipotéticos de sobrevivencia, de acuerdo a densidad de plantación, calidad y preparación del sitio.
- Altura media dominante del rodal inicial ($HDOM_0$).	- En base a curvas de índices de sitio.
- DAP promedio del rodal inicial (D_{c0}).	- $D_{c0} = F (E_0, S, HDOM_0)$. (Tasmanian Forestry Commission, 1979).
- Area basal del rodal inicial (G_0).	- $G_0 = F (S, N_0)$. (Turner et al, 1977). - $G_0 = F (E_0, HDOM_0)$. (Tasmanian Forestry Commission, 1979). - $G_0 = F (N_0, H_0)$. (Grut, 1970).
- Distribución de frecuencias del DAP o tabla de rodal	- En base a la distribución Weibull, en la que sus parámetros son función de D_0, Dmin, $\delta^2 D$ (Clutter and Allison, 1974). - En base a la distribución Weibull, donde sus parámetros se estiman para rodales de $HDOM_0$ = 7 metros. (Alder, 1976).

1/ Estos métodos son de baja precisión y deben ser usados como puntos de partida para la predicción del crecimiento, sólo si no existe información real disponible.

Dmin = DAP mínimo
S = índice de sitio
E_0 = edad inicial
H_0 = altura media inicial
$\delta^2 D$ = varianza del DAP
D_0 = DAP promedio aritmético del rodal inicial.
D_{c0} = DAP del árbol de área basal media del rodal inicial

Distribución Weibull: $f(d) = (c/b)\ (((d - a)/b)^{c-1})\ \exp - ((d - a)/b)^c$

Como se expresó en 2.3 ii) la única práctica silvicultural incorporada extensivamente en los simuladores de rodales es el raleo.

Los tipos de raleo que usualmente se pueden simular son el sistemático por hileras y el raleo por lo bajo. Aquellas cortas intermedias que afectan de modo significativo la altura dominante del rodal no pueden ser simuladas, porque siendo esa altura una de las variables predictoras más importante en los modelos de simulación, su comportamiento no se puede predecir correctamente bajo condiciones que la alteran sensiblemente.

El tipo de raleo, la edad o edades del rodal simulado al tiempo de la intervención y la intensidad del raleo se especifican también a través de las variables de control. La intensidad de esta corta intermedia se determina, comunmente, en términos del número o porcentaje de árboles a extraer o en términos del área basal o proporción de ella a cortar. Funciones de transformación expresan estas instrucciones en términos del volumen de madera raleado y generan el estado del rodal después del raleo.

Otras prácticas silviculturales, tales como fertilización y uso de plántulas genéticamente mejoradas, pueden eventualmente ser incorporadas como variables de control del simulador, pero ellas obligan a construir nuevas relaciones funcionales para las que actualmente existe muy poca información disponible.

3.3 Variables de respuesta

En un modelo de simulación del crecimiento y producción de rodales forestales, las variables de respuesta caracterizan cuantitati-

vamente los efectos de implementar una práctica silvicultural sobre el rodal simulado.

Las prácticas silviculturales incorporadas a los simuladores reportados en la literatura, con una base de datos empíricos confiables, son los raleos y la corta o cosecha final de madera.

Por ende, las variables de respuesta de un simulador son: aquellas que describen el producto del raleo; aquellas que caracterizan el estado del rodal inmediatamente después del raleo y; aquellas que definen el resultado de la corta o cosecha final.

3.3.1 Variables de respuesta a raleos

Como ya se expresó, el usuario de un simulador de rodal puede, si el modelo lo permite, prescribir raleos sobre el rodal simulado a través de variables de control, las que especifican el tipo, intensidad y frecuencia de estas intervenciones.

Si un rodal plantado es sometido a un raleo sistemático por hileras, se puede asumir que la reducción porcentual del volumen del rodal es igual al porcentaje de reducción del área basal y del número de árboles. Así, por ejemplo, la corta sistemática de una de cada tres hileras del rodal, significa aproximadamente la extracción de un tercio del área basal y de un tercio del volumen que tenía la plantación inmediatamente antes del raleo.

Por otra parte, si el raleo resulta en la extracción de árboles con una dimensión media diferente a la del promedio del rodal, el porcentaje del volumen removido no es igual al porcentaje de reducción del área basal o del número de árboles.

Esto último hace indispensable incorporar en el simulador funciones de transformación que permitan expresar la intensidad del raleo en términos equivalentes de área basal, número de árboles y volumen de madera a extraer. De este modo, por ejemplo, si la intensidad de un raleo es especificada como área basal a cortar, será indispensable, para los efectos de expresar el resultado de esta corta intermedia, transformar la instrucción a número de árboles y volumen de madera a extraer, empleando relaciones funcionales de transformación apropiadas.

A objeto de presentar la forma que estas relaciones funcionales de transformación tienen, es conveniente distinguir dos casos:

i) Simuladores que emplean únicamente variables de estado agregadas del rodal

Sea, N_i : el número de árboles por hectárea

G_i : el área basal por hectárea (m^2)

V_i : el volumen de madera por hectárea (m^3)

$$i \begin{cases} = A : \text{antes del raleo} \\ = R : \text{a extraer o ralear} \\ = D : \text{después del raleo} \end{cases}$$

La intensidad del raleo se puede expresar como N_R, G_R o V_R, o bien, como un porcentaje de N_A, G_A o V_A, o también, como N_D, G_D o V_D.

Relaciones funcionales para transformar intensidades de raleo a expresiones equivalentes en otras unidades, son reportadas por los siguientes autores:

Turner et al. (1977):

$$N_R = N_A - N_D$$

donde: $N_D = k_1 N_A \frac{G_D}{G_A} - k_2 E$

Field et al. (1978):

$$N_R = N_A \left(\frac{V_R}{V_A}\right)^{k_1}$$

Rustagi y Díaz (1976):

$$\% N_D = (\% G_D)^{k_1}$$

Field et al. (1978):

$$G_R = G_A \left(\frac{V_R}{V_A}\right)^{k_1}$$

Beekhuis (1966):

$\% G_R$ obtenido de una tabla, en base a $\% N_R$, HDOM y el número correlativo del raleo correspondiente.

Field et al. (1978):

$$V_R = V_A \left(\frac{B_R}{B_A}\right)^{k_1}$$

Turner et al. (1977):

$$V_R = k_1 \, G_R \, HDOM$$

Beekhuis (1966):

$$V_R/G_R = k_1 + k_2 HDOM$$

Rustagi y Díaz (1976):

$$\log V_R = k_1 + k_2 \log G_R + k_3 \log HDOM$$

Field et al. (1978):

$$V_R = V_A \left(\frac{N_R}{N_A}\right)^{k_1}$$

k_j constantes $\forall_j$; E: edad (años); HDOM: altura dominante (m)

Todas estas funciones de transformación son aplicables a raleos por lo bajo.

El estado del rodal inmediatamente después del raleo se obtiene substrayendo de N_A, G_A y V_A los correspondientes valores de N_R, G_R y V_R.

ii) Simuladores que proyectan la tabla de rodal

Dada una tabla de rodal al tiempo simulado t y, conocidos el tipo e intensidad del raleo en t, los simuladores son programados para efectuar la corta intermedia siguiendo un determinado algoritmo.

En raleos sistemáticos por hileras, la distribución del DAP de los árboles cortados es obtenida multiplicando cada una de las frecuencias de las clases diamétricas por un factor constante, cuyo valor depende de la intensidad del raleo.

Para raleos por lo bajo, la reducción de las frecuencias de las clases de DAP no es trivial. Se podría pensar que sería suficiente simular estos raleos mediante la corta de todos aquellos árboles de las clases diamétricas inferiores, hasta que la intensidad de raleo sea satisfecha. Sin embargo, en la práctica se ha observado que los raleos por lo bajo también extraen árboles desde las clases diamétricas intermedias y superiores.

En simuladores de rodales de pino insigne, Clutter y Allison (1974), Alder (1978) y Stark (1979) emplean subrutinas para producir raleos simulados similares a aquellos observados en operaciones reales. Por otra parte, Mc Mullan (1978) utiliza funciones de transformación para predecir la proporción de árboles a ser extraídos desde cada clase de DAP. Todos estos autores reconocen que en raleos por lo bajo los árboles de dimensiones menores tienen una más alta probabilidad de ser extraídos que aquellos de dimensiones mayores, que esta diferencia de probabilidades se reduce a medida que la intensidad del raleo aumenta y, que los árboles de mayor DAP tienen también una probabilidad, aunque baja, de ser removidos.

La distribución de frecuencias del DAP del rodal inmediatamente después del raleo se obtiene por simple diferencia entre la tabla de rodal antes del raleo y la distribución de frecuencias diamétricas de los árboles extraídos.

El volumen de madera cortado en el raleo se estima a partir de esta última distribución, empleando las relaciones funcionales de transformación que se presentan en la sección 3.1.2.2.

3.3.2 Variables de respuesta a la corta final

Si al final de un intervalo de crecimiento el simulador es programado para efectuar la corta final del rodal, las variables de respuesta que caracterizan el resultado de esta intervención, son las mismas que aquellas que describen el estado del rodal en ese punto del tiempo simulado. Es decir, las estadísticas de producción que resultan de la cosecha final incluyen los valores asumidos por las variables de estado del rodal, tanto predictoras como derivadas, al momento de la corta.

Es necesario tener presente que estas estadísticas de producción se refieren a madera en pie, por lo que ellas representan el máximo que se puede obtener del rodal bajo condiciones en las que no existirían pérdidas en la explotación.

Dado que el rendimiento: volumen de madera cortada/volumen de madera en pie, depende de numerosos factores (equipo utilizado, adiestramiento de operarios, accesibilidad, destino de la madera, estipulaciones contractuales bajo las que se realiza la faena), resulta conveniente que el simulador entregue la existencia de madera

en pie y que el usuario, posteriormente, considere los rendimientos apropiados a su caso particular.

3.4 Diagramas de flujo de tres simuladores de Pino insigne representativos

En esta sección se presentan los diagramas de flujo correspondientes a tres modelos de simulación de rodales de pino insigne, considerados representativos de los tipos de simuladores que para esta especie se han reportado en la bibliografía.

El propósito de esta presentación es entregar al lector diagramas que representen, en forma simplificada, la secuencia completa de operaciones que incluyen los simuladores.

MODELO 1

Autores : B.J. Turner, R.W. Bednarz y J.B. Dargavel

Objetivo : Generar alternativas de manejo por rodal, para proporcionar información a un modelo de planificación forestal de largo plazo.

Area de aplicación : Victoria, Australia

Método : Simulación empleando sólo variables de estado agregadas del rodal.

(Ver diagrama de flujo 1)

MODELO 2

Autor : M.J. Mc Mullan. Forestry Commission of New South Wales.

Objetivo : Generar alternativas de manejo por rodal, para proporcionar información a un modelo de optimización.

Area de aplicación : New South Wales, Australia

Método : Simulación empleando proyección de tabla de rodal y variables de estado agregadas. La tabla de rodal es generada como variable derivada.

(Ver diagrama de flujo 2)

MODELO 3

Autor : D. Alder

Objetivo : Generar alternativas de manejo por rodal, para proporcionar información a un modelo de programación de raleos y cosecha final.

Area de aplicación : Regiones de Kenya, Uganda, Tanzania y Malawi

Método : Simulación empleando proyección de tabla de rodal y variables de estado agregadas. La tabla de rodal es una variable predictora.

(Ver diagrama de flujo 3)

La simbología empleada en los diagramas se muestra a continuación de ellos.

DIAGRAMA DE FLUJO 1

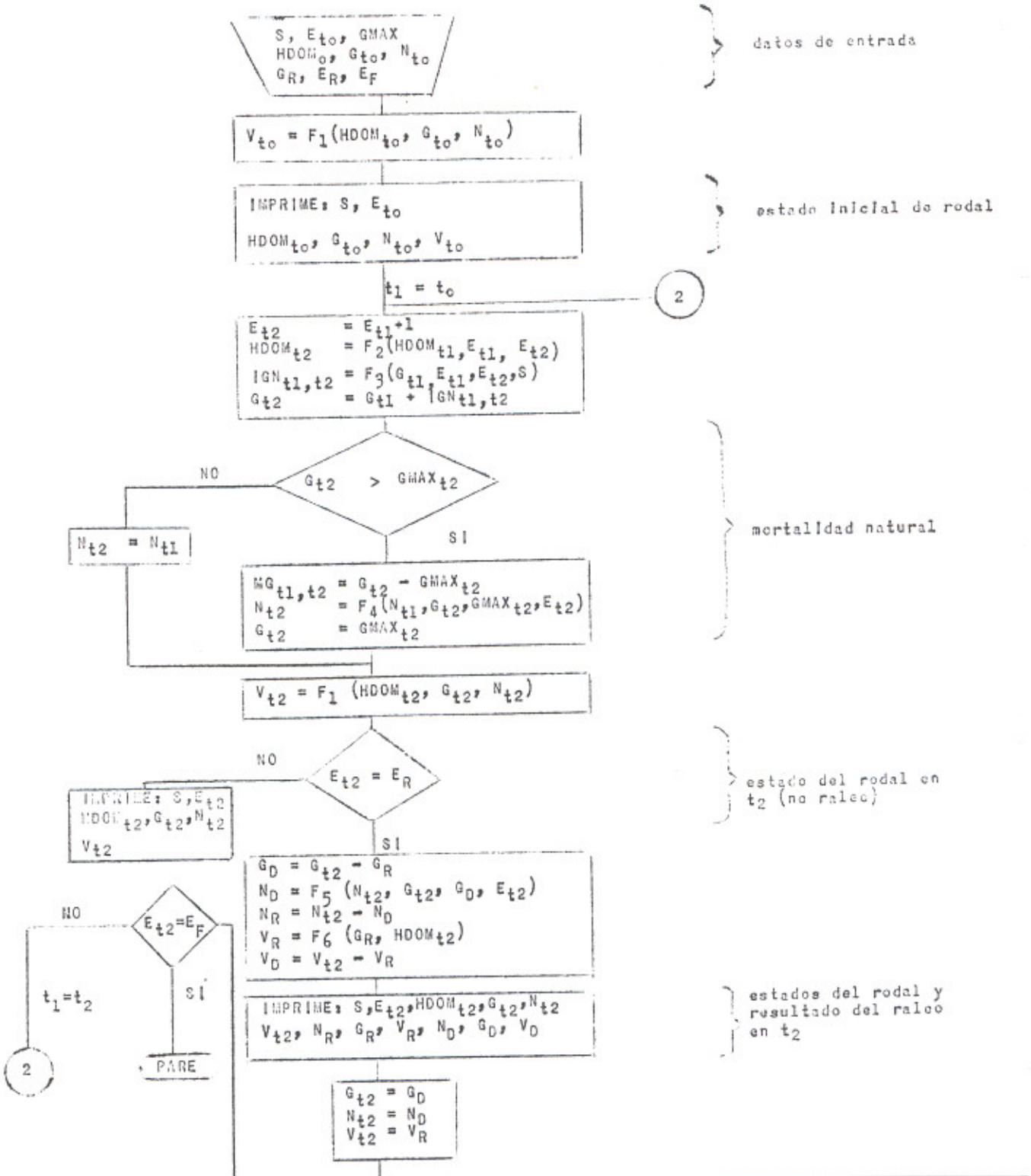
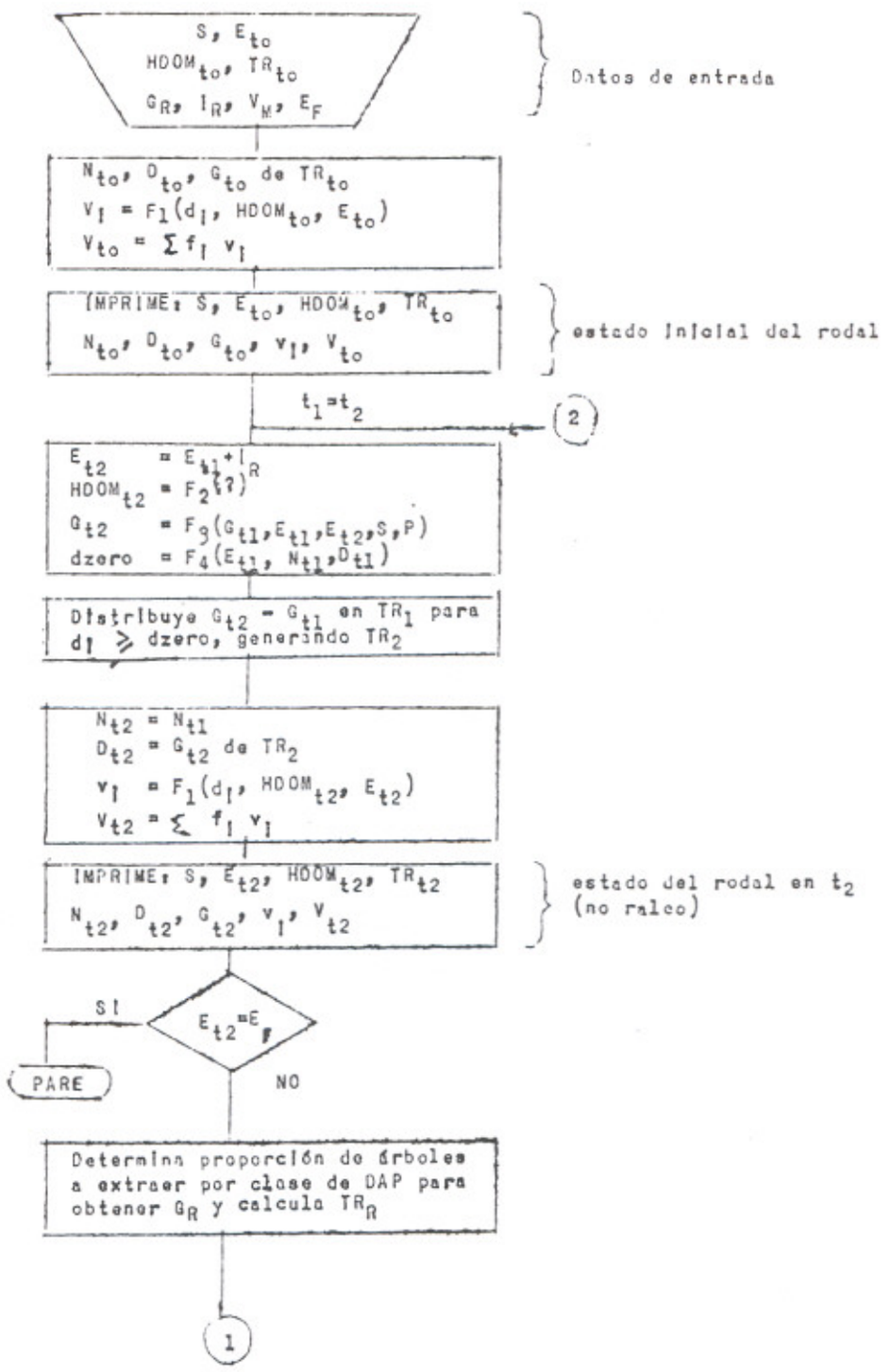


DIAGRAMA DE FLUJO 2



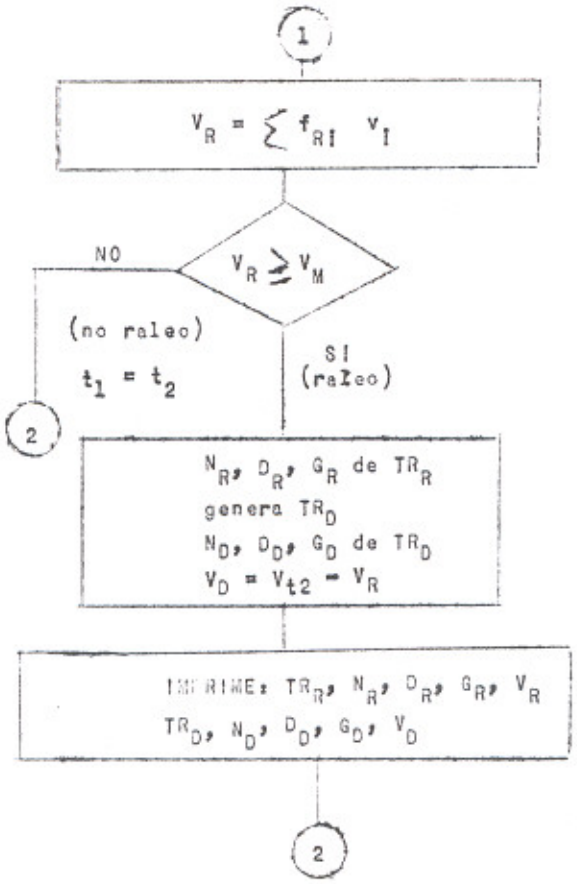
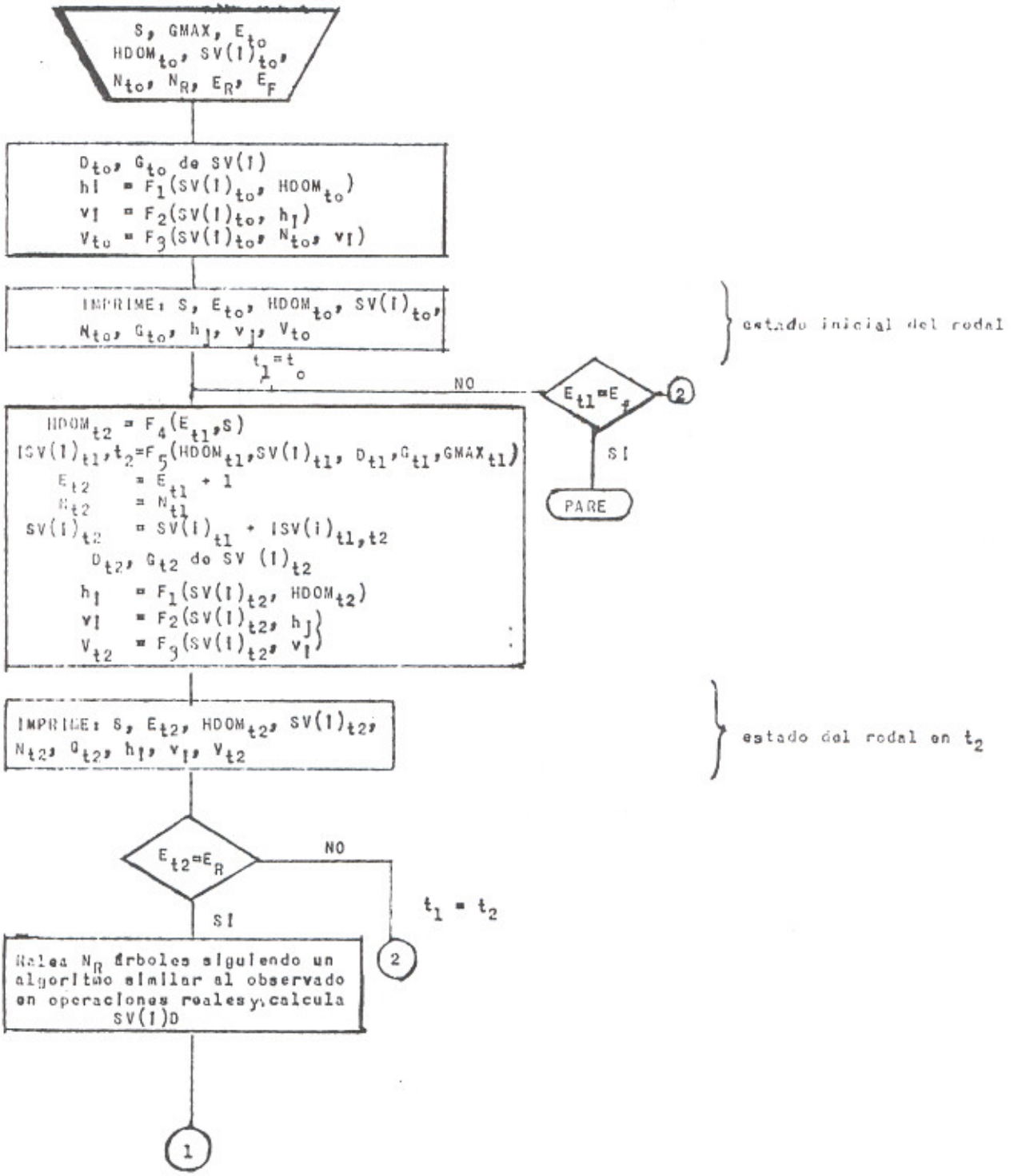
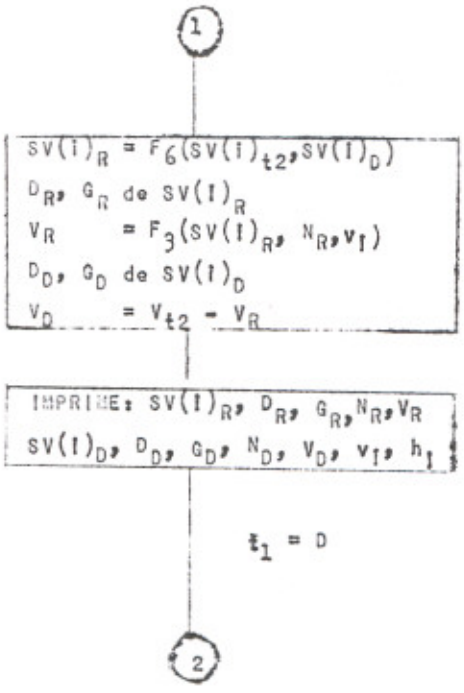

1
$V_R = \sum f_{Ri} \; v_i$
$V_R \geq V_M$
NO
(no raleo)
$t_1 = t_2$
SI
(raleo)
2
N_R, D_R, G_R de TR_R
genera TR_D
N_D, D_D, G_D de TR_D
$V_D = V_{t2} - V_R$
IMPRIME: TR_R, N_R, D_R, G_R, V_R
TR_D, N_D, D_D, G_D, V_D
resultado del raleo en t_2
2

DIAGRAMA DE FLUJO 9





} resultado del raleo en t_2

S = Indice de sitio

$HDOM_J$ = altura dominante

E_j = edad del rodal

N_j = número de árboles

f_I = número de árboles en clase de DAP I

D_j = DAP promedio del rodal

D_I = DAP promedio de la clase I

dzero = DAP bajo el cual el crecimiento de éste es cero

$SV(I)$ = DAP para el cual existe una probabilidad de $(I-1)/10+0,05$ de que cualquier árbol del rodal tenga un diámetro menor.

G_J = área basal del rodal

$GMAX_J$ = área basal máxima del rodal

IGN_J = incremento en área basal neta del rodal

MG_j = mortalidad en área basal del rodal

V_j = volumen de madera del rodal

V_I = volumen de madera del árbol medio de la clase de DAP I

h_I = altura del árbol medio de la clase de DAP I

TR_j = tabla de rodal

I_R = intervalo entre raleos

donde : J = t_o al inicio de la simulación

t_1 al comienzo de un intervalo de crecimiento

t_2 al final de un intervalo de crecimiento

A antes del raleo

R a ralear

D después del raleo

F al final de la simulación

M mínimo