

SERGIO AHRENS

**A Seleção Simultânea do Ótimo Regime de Desbastes
e da Idade de Rotação, para Povoamentos
de *Pinus taeda* L., através de um Modelo
de Programação Dinâmica.**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de "Doutor em Ciências Florestais".

CURITIBA

1992

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

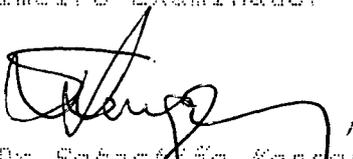
P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato **SERGIO AHRENS**, sob o título "A SELECÇÃO SIMULTÂNEA DO ÓTIMO REGIME DE DESBASTES E DA IDADE DE ROTAÇÃO, PARA POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. ATRAVÉS DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA" para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em **MANEJO FLORESTAL**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese.

Curitiba, 19 de agosto de 1992



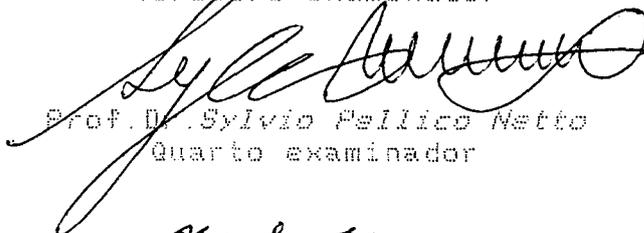
Prof. Dr. Paulo Renato Schneider
Primeiro Examinador



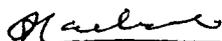
Prof. Dr. Sebastião Kengen
Segundo Examinador



Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto
Terceiro examinador



Prof. Dr. Sylvio Fellico Netto
Quarto examinador



Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado
Presidente da Banca

Aos meus pais, à minha esposa e aos meus filhos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Sebastião do Amaral Machado, pela amizade, compreensão nos momentos difíceis, e pelo irrestrito apoio. Aos meus co-orientadores, Prof. Celso Carnieri e Prof. Vitor Afonso Hoeflich, pelas valiosas sugestões. Ao Prof. Helio Simiena, pela efetiva participação no desenvolvimento do estudo assim como pelas discussões muito proveitosas e estimulantes em Pesquisa Operacional.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, pelo apoio financeiro e pela oportunidade para que este trabalho de pesquisa pudesse ser desenvolvido.

À Papel de Imprensa S.A., PISA, na pessoa dos Engenheiros Florestais Adhemar Villela Filho e Romualdo Maestri, pelo apoio durante a coleta dos dados básicos para o estudo.

Ao Engenheiro Eletricista Luciano Gavinho, da Calculoexato Pesquisa Operacional S/C Ltda., pelo estimulante interesse por este estudo e por ter possibilitado o uso do programa PlanePisa.

Ao Engenheiro Florestal Celso Julio, da Fibra Florestal Ltda., pelas proveitosas discussões acerca de particularidades das práticas de exploração florestal em áreas reflorestadas.

Ao colega Augusto Nakao pelo interesse, pela cooperação e particularmente pela sua competente ajuda em momentos decisivos durante a elaboração do programa para microcomputador.

Em especial aos meus pais, à minha esposa e aos meus filhos, pelo constante apoio e incentivo durante toda esta árdua jornada.

BIOGRAFIA

SERGIO AHRENS, filho de Arthur Egon Ahrens e de Gerda Auth Ahrens, nasceu em Curitiba, PR, em 26 de fevereiro de 1951.

Realizou os cursos Ginásial e Científico no Colégio Militar de Curitiba, em Curitiba, PR. Em 1970 iniciou seus estudos na Universidade Federal do Paraná, onde graduou-se Engenheiro Florestal em dezembro de 1973. Em 1979 e 1980 realizou estudos em Oklahoma State University, Stillwater, OK, EUA, onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais. Durante 1987 e 1988 realizou viagem de estudos e de pesquisas à Nova Zelândia, permanecendo na Universidade de Canterbury, em Christchurch, NZ.

Em 1974 foi contratado pela empresa Jari Florestal e Agropecuária Ltda. (atualmente Cia. Florestal Monte Dourado), no Estado do Pará, onde trabalhou até 1975 como responsável pelo manejo de plantações de espécies tropicais de *Pinus*. Em 1976 trabalhou na empresa Consultoria Florestal Ltda., em Curitiba, PR. Em 1977 trabalhou no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Florestal - PRODEPEF (UNDP/FAO/IBDF/BRA-45). Desde 1978 trabalha como pesquisador em Biometria e Manejo Florestal no Centro Nacional de Pesquisa de Florestas - CNPFlorestas, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, em Colombo, PR. Em 1989 iniciou o programa de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, o qual é concluído com a defesa desta Tese.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
1. INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
2. ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVAS PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO....	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Modelos matemáticos e o processo de tomada de decisão...8	
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. Objetivo geral.....	11
3.2. Objetivos específicos.....	11
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
4.1. Silvicultura e manejo florestal.....	12
4.1.1. Conceitos.....	13
4.1.2. O processo de decisão em silvicultura e manejo....17	
4.2. Sistemas, modelos e o processo de decisão.....	20
4.2.1. Teoria Geral de Sistemas.....	20
4.2.2. Modelos.....	23
4.2.3. A silvicultura como um "Sistema de Produção".....	26
4.3. Regimes silviculturais.....	28
4.4. Regimes de desbaste.....	29
4.4.1. Conceitos.....	30
4.4.2. Métodos de desbaste.....	35
4.4.3. Critérios para a realização de desbastes.....	40
4.5. Rotação.....	42
4.5.1. Conceitos.....	42
4.5.2. Tipos de rotação.....	43
4.5.3. Critérios para a determinação da rotação.....	45
4.6. A seleção de uma taxa de juros.....	54
4.7. A obtenção de estimativas sobre a produção de madeira em diferentes idades.....	56
4.7.1. Modelos de crescimento e de produção.....	56
4.7.2. SisPinus - um sistema integrado para predição do crescimento e da produção.....	58
4.8. A seleção do melhor regime silvicultural.....	59
4.8.1. Métodos alternativos para análise.....	59
4.8.1.1. Enumeração total.....	60
4.8.1.2. Análise Marginal.....	61
4.8.1.3. Técnicas de Pesquisa Operacional.....	63
4.8.2. Características básicas de Programação Dinâmica....64	
4.8.3. Aplicações de Programação Dinâmica na solução de problemas inerentes à Engenharia Florestal.....	66
4.8.4. Limitações quanto ao uso de Programação Dinâmica...70	

5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	72
5.1.	A base de dados para o estudo.....	72
5.2.	Formulação do problema em silvicultura.....	74
5.2.1.	Regimes silviculturais contemplados no estudo.....	74
5.2.2.	Obtenção e tratamento dos dados básicos.....	80
5.2.2.1.	Estimativas da produção de madeira.....	80
5.2.2.2.	Dimensões e preços para madeira em pé.....	82
5.2.2.3.	Custos.....	84
5.3.	Formulação do problema em programação dinâmica.....	85
5.3.1.	O problema como uma rede acíclica.....	86
5.3.2.	Os procedimentos "Forward" e "Backward".....	89
5.3.3.	Os elementos básicos da formulação matemática.....	91
5.3.4.	Expressão generalizada do problema de otimização...	92
5.3.5.	Estrutura da equação de recursividade.....	97
5.3.6.	A conversão dos dados de produção física em valores monetários.....	99
5.4.	A solução do problema através de Enumeração Total.....	103
5.5.	A solução do problema através de Programação Dinâmica.....	105
5.5.1.	O procedimento de otimização.....	105
5.5.2.	A solução do problema em um microcomputador.....	110
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	111
6.1.	O algoritmo de otimização associado à rede.....	111
6.1.1.	A equação de transição de estados.....	111
6.1.2.	Processamento em microcomputador.....	112
6.1.3.	Descrição detalhada do algoritmo desenvolvido.....	114
6.2.	Programação Dinâmica vs. Enumeração Total.....	120
6.3.	A solução ótima e as hipóteses de trabalho.....	125
6.4.	Particularidades do problema e do modelo.....	127
6.4.1.	A discretização do tempo.....	127
6.4.2.	A natureza dos regimes silviculturais.....	128
6.4.3.	As decisões de desbaste e os retornos monetários..	130
6.4.4.	O "Princípio de Otimidade de Bellman".....	131
6.5.	Implementação da solução ótima.....	133
6.6.	Alternativas para a estruturação do problema.....	135
6.6.1.	Variações para a estrutura básica proposta.....	135
6.6.1.1.	Otimização da produção do volume de madeira.....	135
6.6.1.2.	Uma única idade de rotação.....	136
6.6.1.3.	Espaçamentos iniciais alternativos.....	137
6.6.1.4.	A integração entre um modelo de crescimento e de produção e um modelo de otimização.....	139
6.6.2.	Programação Dinâmica Estocástica.....	141
6.6.3.	Método do Caminho Mínimo.....	144
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	147
	SUMMARY.....	152
	ANEXOS.....	153
8.	GLOSSÁRIO.....	174
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Produção bruta de madeira em povoamentos florestais desbastados e não desbastados (segundo CLUTTER et al. ⁴⁰ , p.70).....	34
2. Curva do Crescimento Cumulativo (a) e Curvas do Crescimento Médio Anual - IMA e do Crescimento Corrente Anual - ICA (b) para povoamentos florestais homóclitos equiano (modificado após HUSCH et al. ⁸¹ , e, AVERY & BURKHART ¹¹).....	48
3. Regiões bioclimáticas do Estado do Paraná e localização da área de coleta dos dados básicos para o estudo.....	73
4. Regimes silviculturais considerados neste estudo....	75
5. Componentes fundamentais do modelo de otimização desenvolvido neste estudo.....	86
6. Representação esquemática do problema de silvicultura segundo um modelo de redes.....	88
7. A perspectiva cronológica de uma decisão de desbaste	95
8. A perspectiva cronológica de quatro decisões de desbaste.....	96
9. Fluxo de caixa típico para decisões em silvicultura.	101
10. Estrutura do problema de otimização segundo um modelo de redes com 13 estágios.....	108
11. Estrutura do problema de otimização segundo um modelo de redes com 9 estágios.....	109
12. A estrutura do algoritmo de otimização.....	117
13. Representação hipotética de uma decisão de desbaste segundo um problema de Programação Dinâmica Estocástica.....	138
14. Concepção hipotética de uma estrutura de rede para um problema de otimização com espaçamentos iniciais alternativos.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Dimensões e preços das toras, por classe de matéria-prima (US\$/m ³ sol. cc./ha, madeira em pé).....	83
2. Valores para os custos operacionais (US\$/ha).....	85
3. Matriz do número de decisões factíveis por estado (matriz <u>U</u> , arquivo NDEST.PRN).....	118
4. Matriz de estados factíveis por estágio (matriz <u>X</u> , arquivo NEFAC.PRN).....	119
5. Ordenamento dos regimes silviculturais segundo o Valor Esperado da Terra (VET, US\$/ha): solução via Enumeração Total.....	121
6. Matriz de retornos acumulados T[k,x[k,i],2].....	122
7. Matriz de recuperação de trajetórias T[k,x[k,i],1]..	123

RESUMO

Descreve-se o desenvolvimento de um modelo de otimização que possibilita a determinação simultânea do ótimo regime de desbastes e da rotação econômica para povoamentos de *Pinus taeda* L.. Examinando aquele problema de decisão na forma de um "Estudo de Caso", a pesquisa fez uso de informações básicas sobre classe de sítio, custos de produção e preços para madeira em pé, coletadas junto à empresa "Papel de Imprensa S.A.", localizada em Jaguariaíva, PR. As estimativas de produção de madeira, por sortimentos, foram obtidas através do uso de uma versão aprimorada de um Simulador de Crescimento e de Produção disponível no Centro Nacional de Pesquisa de Florestas (EMBRAPA-CNPFFlorestas). A análise considerou quarenta e quatro regimes silviculturais alternativos de modo que fosse possível contemplar três diferentes objetivos: quatro regimes direcionados para a produção exclusiva de biomassa, vinte regimes para a produção preferencial de toras para serraria ou laminação, e vinte regimes para a produção de madeira para usos múltiplos. Três classes de produto foram consideradas: madeira para celulose, toras para serraria e toras para laminação. Para alguns regimes, a análise também considerou a possibilidade de se executar desbastes pré-comerciais. Um modelo de Programação Dinâmica Determinística foi desenvolvido objetivando solucionar este problema de decisão. O problema foi estruturado de forma analógica através de uma rede com nove estágios, admitindo-se, para cada qual, até quarenta e quatro estados. O Valor Esperado da Terra (VET) foi utilizado como critério para avaliação das decisões parciais na rede. Duas características inovadoras do modelo desenvolvido são: a) a avaliação de regimes que além de teoricamente factíveis podem ser efetivamente utilizados a nível operacional; e, b) o procedimento "backward" foi aplicado com êxito a um problema com diferentes idades para rotação, superando, desta forma, as supostas limitações, reportadas por outros autores, quanto ao uso deste método de solução para esta classe de problemas de otimização. Além de desenvolver um modelo de otimização para uso generalizado, desde que mantidas a natureza e a estrutura do problema, o estudo foi concebido também com o propósito de demonstrar a aplicabilidade desta técnica de Pesquisa Operacional para a solução desta classe de problemas de decisão. Pela análise do desempenho do modelo conclui-se que a formulação em Programação Dinâmica foi adequada tanto para se caracterizar a natureza do problema como para se determinar a solução ótima. Os resultados indicaram que Programação Dinâmica é uma técnica de otimização aplicável para a solução do problema, uma vez que esta propicia, com vantagens computacionais, a mesma solução ótima obtida por Enumeração Total. Detalhes do algoritmo de otimização desenvolvido são descritos e discutidos. Dentre as recomendações para futuros trabalhos de pesquisa inclui-se o desenvolvimento de um modelo de Programação Dinâmica Estocástica que incorpore distribuições de probabilidade associadas com as estimativas de produção de madeira, ou com os possíveis e respectivos preços, no tempo. O uso do Método do Caminho Mínimo também é sugerido como um procedimento de solução a ser examinado.

1. INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.

Este documento descreve um trabalho de pesquisa desenvolvido com o propósito de solucionar um problema clássico e central tanto para a silvicultura como para o manejo de plantações florestais:

"Dispondo-se de um povoamento florestal homóclito equiano, estabelecido em regime de alto fuste, e considerando a possibilidade de se produzir toras para diferentes utilizações, i.e. por sortimentos, qual o melhor programa de desbastes (em termos de idade(s), método(s) e intensidade(s)), e, simultaneamente, qual a melhor idade para rotação?"

Obviamente, sabe-se que uma resposta para esta questão fundamental deverá representar uma síntese ponderada de todos os fatores que, isoladamente, ou de forma integrada e complementar, tenham alguma influência relevante na prescrição de um regime silvicultural. Este último, por sua vez, deve ser concebido para um conjunto especificado de circunstâncias e condições. Na solução daquele problema, portanto, deve-se considerar pelo menos alguns fatores básicos, reunidos, frequentemente, como segue:

- a) a natureza da propriedade florestal e os objetivos para a produção;
- b) as diversas condicionantes econômico-financeiras que tenham sido identificadas (como, por exemplo, os preços para a madeira, os custos de produção, e as condições do mercado); e,
- c) as características de crescimento e de produção da espécie florestal de interesse quando esta for submetida a práticas silviculturais alternativas.

Desta maneira, ao formular a justificativa para a sua decisão, o proprietário florestal, ou o profissional que o

representa para este fim, deverá considerar uma multiplicidade de condições e fatores que deverão, em seu conjunto, substanciar as bases em que o processo de decisão foi efetivado. Torna-se evidente, portanto, que a questão, inicialmente colocada de forma simples e direta, implica em uma resposta resultante da consideração simultânea de diversos fatores. Estes últimos, por outro lado, estão frequentemente sujeitos a interações de elevado grau de complexidade, o que dificulta, sobremaneira, satisfazer aquela questão básica com uma resposta segura, exclusiva e definitiva.

O problema descrito é com frequência observado na prática da silvicultura e do manejo de plantações de *Pinus* spp. na Região Sul do Brasil. Além de estar inserido no manejo de grandes propriedades florestais, este problema de decisão é também particularmente importante no contexto do planejamento da produção de madeira na pequena propriedade rural. Face à existência do problema, como enfatizado, e considerando a sua evidente relevância para o setor florestal brasileiro, este estudo foi concebido com o propósito de desenvolver um modelo de otimização que possa facilitar o processo de tomada de decisão anteriormente caracterizado.

Neste estudo, aquele problema de decisão é apreciado segundo a perspectiva do produtor de madeira em plantações florestais, a nível de unidade de área. Dados numéricos coletados em plantações de *Pinus taeda* L. estabelecidas em áreas de propriedade da empresa Papel de Imprensa S.A. (PISA), em Jaguariaíva, PR, foram

utilizados para se caracterizar um "Estudo de Caso". O estudo fez também uso de um Simulador de Crescimento e de Produção para gerar as estimativas de produção de madeira necessárias ao processo de determinação da solução ótima.

A estrutura do modelo de otimização desenvolvido permite a sua utilização como um instrumento auxiliar e de suporte no exame integrado de diferentes alternativas para desbaste e idade de rotação, tanto no tempo (idades), no espaço (intensidade de remoção) como no método (sistemático, seletivo ou a combinação destes). Incorporando o uso de Programação Dinâmica Determinística, o modelo de otimização desenvolvido indica as especificações do melhor regime silvicultural para povoamentos estabelecidos com a espécie florestal considerada.

Este documento é organizado em capítulos apresentados de acordo com a seguinte ordem de exposição:

O Capítulo 2 descreve os antecedentes que caracterizam a existência do problema no contexto da silvicultura e do manejo de plantações de espécies de *Pinus* na região Sul do Brasil. As justificativas para a realização da pesquisa estão associadas ao reconhecimento da importância de se desenvolver e utilizar modelos matemáticos como instrumentos de suporte no planejamento da produção florestal.

Os objetivos geral e específicos do trabalho desenvolvido estão descritos no Capítulo 3.

O Capítulo 4 contém uma análise crítica da literatura referente aos elementos mais relevantes que caracterizam tanto a

natureza do problema como a sua solução. Desta forma, após posicionar o problema na sua devida perspectiva em relação à Silvicultura e ao Manejo Florestal, examinam-se alguns conceitos fundamentais sobre a Teoria Geral de Sistemas, Modelos Matemáticos, Desbastes, e Idade de Rotação. Os métodos alternativos para solucionar o problema de otimização descrito são também caracterizados. O uso de Programação Dinâmica como método de solução é enfatizado.

A base de dados para o "Estudo de Caso" e uma descrição detalhada dos métodos utilizados nesta pesquisa são apresentadas no Capítulo 5.

O Capítulo 6. reporta os resultados obtidos, descreve o algoritmo de otimização desenvolvido, e comenta as possibilidades e as limitações para a sua utilização. A discussão dos resultados contempla também possibilidades alternativas para a estruturação do problema tanto em Silvicultura como em Pesquisa Operacional.

Finalmente, no Capítulo 7. são documentadas as conclusões mais relevantes do estudo. Recomendações de temas para futuros trabalhos de pesquisa são também apresentadas.

2. ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVAS PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO.

2.1. Antecedentes:

Na prática da silvicultura de plantações de *Pinus* spp., sempre existe a necessidade de se tomar decisões acêrca do espaçamento inicial a ser utilizado, do regime de desbaste a adotar (em termos da sua intensidade, método e idade de execução) assim como sobre a idade de corte final ou idade de rotação.

Em diversos países, e assim também no Brasil, decisões desta natureza são tradicionalmente, e com bastante frequência, tomadas somente com base nas expectativas de produção física (i.e., o volume de madeira que pode ser produzido em algum momento presente ou futuro, em consequência à execução de determinada prática silvicultural). No Brasil, tais decisões são, eventualmente, também fundamentadas nos custos associados às soluções opcionais para uma determinada operação, como por exemplo o plantio de mudas (MONTEIRO & CORDEIRO⁹⁹), métodos alternativos para a execução do desbaste em uma idade definida (BERTOLOTTI et al.²⁰, GARRIDO et al.⁶⁹), ou a escolha de equipamento. Na prática da silvicultura e do manejo de plantações de *Pinus elliottii* Eng. var. *elliottii* e *P. taeda* L, nos estados da região Sul do Brasil, observa-se, também, com frequência, que desbastes somente são realizados se a sua execução for considerada financeiramente compensatória (i.e. somente quando a receita obtida com a madeira removida em consequência a um desbaste for superior aos custos da sua realização).

Adicionalmente, existem fortes evidências de que os programas de desbaste praticados em plantações de *Pinus* spp. no Brasil, obedecem a uma mesma estrutura básica, muito embora sejam adotados por proprietários florestais que atuam em diferentes condições edafo-climáticas, localizações distintas e mercados igualmente específicos. A este respeito, AHRENS⁴ reporta resultados de um levantamento realizado por meio de questionários enviados a 15 empresas florestais. Aquele estudo, direcionado para plantações de *Pinus* spp., revelou a prática de regimes silviculturais muito semelhantes (em termos de espaçamento inicial, programa de desbastes e idade para corte final), sem que nenhuma razão justificável pudesse ser identificada. Uma possível explicação para este fato talvez possa ser encontrada na existência de documentos patrocinados por órgãos do governo, com o propósito de orientar a comunidade de proprietários florestais. Um exemplo destas iniciativas é o trabalho técnico elaborado por SIMÕES et al.¹³³ e que, além de documentar muitos resultados experimentais, apresenta informações bastante detalhadas acerca de práticas silviculturais adotadas, com sucesso, por grandes empresas do setor florestal Brasileiro: aparentemente, muitas daquelas práticas foram adotadas na forma de "recomendações para uso generalizado". Outra provável influência poderia ser creditada à simples e direta adoção das práticas utilizadas em outros países como a África do Sul (RAMOS¹¹⁷) e o Chile, sem qualquer questionamento quanto à sua real aplicabilidade às condições no Brasil. De qualquer maneira, entende-se que aquelas

formas de se proceder não são necessariamente as mais adequadas, propiciam uma eficiência ilusória e podem estar produzindo resultados econômicos aquém das reais possibilidades.

Este é um problema de decisão extremamente complexo. Como enfatizado, historicamente, no Brasil, a questão tem recebido uma apreciação somente parcial, uma vez que diferentes estudos têm examinado cada componente do problema de forma isolada e individual. Por vezes, pretendeu-se até mesmo produzir soluções que supostamente pudessem ser generalizadas. Certamente, no entanto, as maiores dificuldades têm ocorrido em função da insuficiência de dados na quantidade e na qualidade requeridas. De forma análoga, o uso de métodos tradicionais e inadequados de pesquisa, como, por exemplo, o estabelecimento de experimentos isolados de desbaste, com tratamentos muito restritivos e rígidos, tem limitado o progresso das investigações na área.

Na atualidade, a existência de modelos de crescimento e de produção, fundamentados em uma ampla base de dados, permite que estimativas acerca da produção presente e futura de madeira sejam obtidas para diferentes condições na prática da silvicultura. Adicionalmente, reconhecendo que o tratamento da silvicultura pela perspectiva de um "Sistema de Produção" poderia acrescentar diversos benefícios à sua análise quantitativa, pesquisadores nesta área de estudos têm sugerido o uso de algumas técnicas de Pesquisa Operacional, e destas, particularmente Programação Dinâmica, para a solução desta classe de problemas de decisão.

2.2. Modelos matemáticos e o processo de tomada de decisão:

O processo de tomada de decisão em questões de silvicultura e de manejo florestal pode ser caracterizado como um fenômeno típico de heurística.¹ Adicionalmente, ao examinar um problema, o agente da decisão raramente irá se fundamentar em uma fonte única e isolada de informações para então selecionar uma solução-alternativa a ser implementada. Na grande maioria das situações, o processo de se tomar uma decisão é baseado em diversos fatores, organizados, por conveniência, e para este estudo, como segue:

- a) aspectos de política interna da organização e os objetivos que tenham sido previamente estabelecidos para o planejamento;
- b) considerações sobre a experiência do profissional no tratamento anterior de questões similares;
- c) assessoria com consultores, analistas e profissionais em planejamento; e,
- d) resultados obtidos com o uso de modelos analíticos (como, por exemplo, modelos de simulação e modelos de otimização).

Ao se considerar, portanto, as diferentes fontes de informação que alimentam qualquer processo de decisão em Engenharia Florestal, evidencia-se o fato de que dificilmente os resultados obtidos pelo uso de um modelo analítico serão utilizados na prática do planejamento, de forma direta e sem modificações, ou sem que pelo menos algumas adequações sejam introduzidas. Saliente-se também que modelos analíticos jamais

¹Na análise científica dos problemas de decisão, um fenômeno de "heurística" ocorre quando o que se deseja é tão somente uma solução satisfatória e aproximada, e não necessariamente uma "solução ótima" no sentido específico do uso desta expressão em Pesquisa Operacional.

serão um substituto para o processo de decisão propriamente dito. Se adequadamente concebidos e quando utilizados com sensatez, racionalidade e bom senso, no entanto, tais modelos podem ser extremamente úteis como instrumentos de suporte e de orientação para os responsáveis pela tomada de decisões.

Nestas circunstâncias, entretanto, o seguinte questionamento é pertinente:

"Se o agente da decisão quase nunca implementa os resultados de uma análise quantitativa decorrente da utilização de um modelo matemático, porque então alguém deveria se preocupar em desenvolvê-los?"

Uma resposta bastante simplificada para esta pergunta indica que o processo de tomada de decisões será tanto mais eficiente quanto melhor possam ser avaliados, por antecipação, os efeitos e as consequências para as diferentes estratégias passíveis de utilização (i.e., sem que estas tenham sido efetivamente implementadas para gerar aquela informação). Contribuem para esta realidade os seguintes fatores:

- a) a carência de informações sobre a natureza intrínseca dos problemas em Silvicultura e em Manejo Florestal;
- b) o desconhecimento acêrca das consequências que podem resultar da implementação de diferentes soluções para aqueles problemas;
- c) os longos prazos que caracterizam a atividade florestal; e,
- d) a incerteza e os níveis de risco associados a um determinado problema.

A constatação da existência daqueles fatores, assim como o reconhecimento da sua relevância, e a evidente utilidade dos modelos analíticos para a solução de problemas em Manejo

Florestal são motivos suficientes para justificar o desenvolvimento do estudo reportado neste documento na forma de uma contribuição aos esforços de pesquisa científica nesta área de conhecimentos.

3. OBJETIVOS.

3.1. Objetivo geral:

"Desenvolver um modelo matemático que possibilite identificar, simultaneamente, o ótimo sequenciamento das decisões alternativas de desbaste(s) e de corte raso, para povoamentos de *Pinus taeda* L.."

Desta forma, considerando uma determinada densidade inicial de árvores por unidade de área, um nível de produtividade potencial conhecido (classe de sítio) e dado um conjunto de regimes alternativos para a realização de desbastes, assim como a disponibilidade de rotações opcionais, o referido modelo deverá selecionar a "melhor combinação econômico-financeira" para as decisões de corte, de modo que se maximize o retorno financeiro do investimento, avaliado através do Valor Esperado da Terra (VET). Deve-se considerar ainda a possibilidade de se produzir até três diferentes categorias de matéria-prima: toras de pequeno diâmetro (para transformação em cavacos), toras para serraria e toras para laminação.

3.2. Objetivos específicos:

- a) "Estabelecer a estrutura matemática do modelo de otimização proposto acima, fazendo uso de Programação Dinâmica Determinística;"
- b) "Descrever e discutir a sequência dos procedimentos quantitativos necessários para o desenvolvimento do mencionado modelo, exemplificando a sua utilização, com dados coletados em Jaguariaíva, PR;" e,
- c) "Apresentar, na forma de um algoritmo, o modelo de otimização desenvolvido."

4. REVISÃO DE LITERATURA:

O ótimo sequenciamento das decisões de desbaste para um povoamento florestal (segundo idades, métodos e intensidades alternativas) é uma questão técnica bastante difícil de ser solucionada. Acrescente-se àquela questão a possibilidade de se decidir também, e, simultaneamente, sobre a idade ótima para o corte final (i.e. a idade para rotação), e o resultado será um problema de extrema complexidade.

Pelo exposto, e tendo em vista os vários fatores que podem ser considerados em uma análise quantitativa da questão, fica evidenciado que aquele problema, assim como a sua solução, ocorrem em um espaço multidimensional, e, portanto, multidisciplinar. Por este motivo, a revisão de literatura apresentada na sequência contempla aspectos relevantes das seguintes áreas de conhecimento: Métodos Silviculturais, Biometria, Dendrometria, Manejo Florestal (e o processo de tomada de decisão), Economia Florestal e Pesquisa Operacional. Um exame dos conceitos de Silvicultura e de Manejo Florestal, objetivando posicionar aquele problema de decisão em sua correta perspectiva, é, no entanto, uma necessidade primordial.

4.1. Silvicultura e manejo florestal:

Apesar do substancial crescimento e do inquestionável progresso observados no setor florestal brasileiro,

particularmente durante estas três últimas décadas, a Engenharia Florestal, e, em especial, a Ciência Florestal, no Brasil, podem ser consideradas relativamente jovens, quando comparadas a outros países com mais tradição florestal. Por este motivo, possivelmente, os conceitos de Silvicultura e de Manejo Florestal são por vezes utilizados de forma indevida, e, às vezes, até mesmo como sinônimos.

BURGER²⁷ também observou tal fato ao afirmar que:

"(....) no Brasil, 'Manejo' tem sido utilizado para significar tanto a aplicação de tratamentos silviculturais a nível de um povoamento florestal, como o gerenciamento, propriamente dito, da empresa florestal."

No contexto desta pesquisa, e considerando, portanto, que o tema sob estudo deve ser apreciado simultaneamente segundo a perspectiva da Silvicultura como do Manejo Florestal, uma diferenciação entre o significado de tais expressões técnicas se faz necessária.

4.1.1. Conceitos:

A noção de "Práticas Silviculturais" já se encontra bastante difundida e consagrada em diferentes segmentos profissionais do Setor Florestal Brasileiro. O real significado da expressão "Práticas de Manejo", no entanto, ainda está por ser esclarecido de forma precisa. Aparentemente, a causa para o uso indevido destes termos pode se encontrar na falta de um adequado entendimento sobre o que está implícito aos conceitos de Silvicultura e de Manejo Florestal, assim como acêrca da sua diferenciação.

O exame da literatura (BAKER¹³, KÖSTLER³¹, SMITH^{134, 135}, EVANS³⁸, DANIEL et al.⁴³, SHEPHERD¹³¹) revelou a existência de algumas definições para Silvicultura. Dentre as definições disponíveis, aquela fornecida por SMITH¹³⁴, p.1-18, é ainda atual, bastante objetiva e contém uma síntese dos elementos conceituais mais relevantes desta área técnica:

"A Silvicultura é constituída pela teoria e pela prática do controle do estabelecimento, da composição e do crescimento de povoamentos florestais."

A literatura contemporânea em Manejo Florestal, por outro lado, não dispõe de uma definição que pudesse condensar a essência do pensamento corrente nesta área de conhecimentos: i.e. o "Processo de Tomada de Decisões" acêrca do gerenciamento de um recurso florestal. Nestas circunstâncias, e após examinar alguns textos clássicos nesta área técnica (CHAPMAN³⁰, KNUCHEL³⁰, DAVIS⁴⁵, LEUSCHNER³⁵, KILKKI³⁸ e DAVIS & JOHNSON⁴⁶), elaborou-se o seguinte conceito, suficientemente genérico e atual para ser adotado neste estudo:

"Manejo Florestal trata do desenvolvimento e da aplicação de técnicas de análise quantitativa nas decisões acêrca da composição, da estrutura e da localização de uma floresta, de tal maneira que sejam produzidos os produtos, serviços e/ou benefícios, diretos ou indiretos, na quantidade e na qualidade requeridas por uma organização florestal, ou por toda uma sociedade."

A diferença básica entre os conceitos de Silvicultura e Manejo Florestal está na identificação das unidades fundamentais de estudo e de trabalho de cada qual: o "Povoamento Florestal" como a célula básica em Silvicultura, e a "Floresta", i.e. um agregado de povoamentos florestais, como o objeto do Manejo.

SMITH¹³⁴ (p.13-18) caracteriza adequadamente como estes termos devem ser diferenciados e de que forma esta distinção se manifesta na prática da Engenharia Florestal.²

Sabe-se também que na Silvicultura são utilizados procedimentos descritivos e que enfatizam uma descrição qualitativa dos diferentes aspectos biológicos que caracterizam "... o estabelecimento, a composição e o crescimento de um povoamento florestal". Manejo Florestal, por outro lado, implica na organização e no gerenciamento de um conjunto de povoamentos florestais na forma de uma floresta integrada, processos nos quais prepondera a aplicação de procedimentos quantitativos de descrição, de análise e de suporte à tomada de decisões.

Desta forma, Silvicultura e Manejo Florestal não são conceitos paralelos mas sim complementares e interdependentes. Nenhum "Plano de Manejo" pode ser melhor que as práticas silviculturais que nele estão inseridas. De forma análoga, nenhum tratamento silvicultural será melhor que os resultados econômicos que venham a ser obtidos em consequência à sua aplicação. Ou seja, o Manejo Florestal trata da floresta como um todo, e assim sendo, as decisões de silvicultura a tomar com respeito a um povoamento florestal devem considerar o que se decide em relação aos demais povoamentos, no contexto de uma mesma floresta.

Adicionalmente, a concepção de prescrições silviculturais,

²Há que se reconhecer a existência de Povoamentos Florestais Homóclitos Equiano (por exemplo, uma área de pequena extensão, coberta com uma monocultura homogênea em sua condição silvicultural), e Povoamentos Florestais Heteróclitos Dissetâneos (uma pequena área com cobertura florestal natural ou nativa).

assim como a sua implementação devem ser precedidas pelo estabelecimento de um ou mais objetivos para a produção, a curto, médio e longo prazos. Desta forma, um "Plano de Manejo" deve ser elaborado documentando o conjunto de estratégias e procedimentos gerenciais, assim como o sequenciamento cronológico e espacial de ações de silvicultura previstas de tal modo que os objetivos sejam alcançados da forma mais adequada possível.

Apesar da diferenciação anteriormente apresentada, um "Recurso Florestal" pode tanto ser um extensa área com cobertura florestal (uma Floresta) como um Povoamento Florestal, de pequena extensão. Qualquer área com cobertura florestal pode ser submetida a alguma forma de planejamento. Assim, segundo CLUTTER et al.⁴⁰ (p.210) qualquer situação em planejamento e em manejo florestal deverá pertencer a uma das duas seguintes situações básicas:

- a) planejamento do manejo a nível de um povoamento florestal: i.e. aquelas situações em que o planejamento pode ser realizado de forma independente para cada povoamento florestal (por exemplo, na pequena propriedade rural); e
- b) planejamento do manejo a nível de uma "Floresta": situações nas quais o planejamento deve ser realizado de forma coordenada, analisando as ações e intervenções em todos os povoamentos florestais de uma floresta, de forma integrada, interrelacionada e interdependente. (este é o caso, por exemplo, dos grandes empreendimentos florestais, com extensas áreas reflorestadas).

Referindo-se a grandes propriedades florestais, como, por exemplo, as florestas estabelecidas para fins industriais, GADOW⁶⁷ argumenta que o planejamento a nível de povoamento florestal somente terá sentido se for realizado no contexto do

planejamento a nível da floresta. De forma análoga, o planejamento da produção a nível da floresta será igualmente irrelevante a não ser que seja suportado por um adequado planejamento a nível de povoamento. Os dois níveis de planejamento são, portanto, atividades mutuamente dependentes e que devem ser consideradas de forma simultânea.

Para o presente estudo é particularmente relevante observar que o problema de decisões acêrca da realização de desbastes e do corte final ocorre em um contexto específico (o Povoamento Florestal) e simultaneamente global (o Povoamento como um componente de uma Floresta) e para os quais convergem portanto as perspectivas tanto da Silvicultura como do Manejo Florestal.

4.1.2. O processo de decisão em silvicultura e manejo:

O processo de tomada de decisões, em qualquer atividade do ser humano, é um exercício mental extremamente complexo. Em sua essência, o ato de se tomar uma decisão é um atributo do intelecto, e que, desta forma, pertence ao domínio da lógica, um tema que transcende os propósitos deste estudo. Devido às suas características subjetivas, dificilmente alguma técnica ou procedimento analítico poderiam representar aquele fenômeno com total fidelidade e na sua plenitude. Certamente, alguns aspectos como a capacidade de julgamento e a experiência acumulada pelo agente de decisão, não podem ser quantificados com racionalidade. É por este motivo, provavelmente, que a literatura específica

desta área de estudos com frequência utiliza a expressão "modelo de suporte à decisão" e não, simplesmente, "modelo de decisão".

Apesar das evidentes dificuldades em se formalizar o processo de tomada de decisões, algumas importantes contribuições, e que formam os fundamentos teóricos do conhecimento atualmente disponível nesta área de conhecimentos, podem ser encontradas nos trabalhos documentados por ACKOFF & SASIENI², e CHURCHMAN³⁷. Com respeito à Engenharia Florestal, os estudos reportados por CHRISTIANSEN³⁶, assim como por DUERR et al.⁵⁰, são particularmente relevantes. Neste sentido, e conforme descrito por CLUTTER et al.⁴⁰ (p.206), Manejo Florestal (e, em especial, o manejo de plantações florestais), pode ser dividido em três componentes básicos:

- a) tomada de decisão: envolvendo a identificação de um problema, a concepção e o exame de soluções - alternativas, e, destas, a seleção da "melhor" [segundo um critério de decisão previamente selecionado];
- b) implementação: a realização, na prática, das atividades necessárias para completar o programa implícito na solução alternativa selecionada; e,
- c) controle [ou monitoramento]: o processo de se garantir que as atividades implementadas foram efetivamente executadas, e a verificação de que os resultados obtidos foram realmente aqueles esperados.

Ainda segundo Clutter e seus colaboradores, o processo de se tomar uma decisão, que é a razão maior para o presente estudo, pode ser caracterizado por quatro etapas: a identificação do problema, a especificação de estratégias ou soluções-alternativas para o problema, a escolha de um critério para análise comparativa das estratégias e, por último, a seleção da melhor

alternativa ou estratégia.

A correta identificação de um problema, assim como a sua adequada descrição, compõem, certamente, a etapa mais importante em qualquer problema de decisão. Assim ocorre porque problemas que não tenham sido identificados e descritos de forma apropriada, simplesmente permanecem sem solução, ou, eventualmente, podem até ser solucionados de forma indevida.

Supondo-se que um problema tenha sido adequadamente identificado e descrito, o agente de decisão deve então especificar as diversas estratégias ou alternativas factíveis para a sua solução. Na sequência, as diferentes estratégias sob análise devem ser comparadas por meio de um critério de decisão apropriado.³ Ordenando-se as diferentes soluções-alternativas segundo o critério de decisão utilizado, seleciona-se então aquela que mais satisfaz aos interesses e objetivos do proprietário ou da organização florestal.

Problemas de decisão em Silvicultura e em Manejo Florestal são frequentemente caracterizados por um elevado número de fatores ou componentes interrelacionados. Por outro lado, quando um problema envolve vários componentes, pode ser também apreciado

³Na silvicultura de produção, e, em especial, quando o proprietário florestal objetiva alcançar benefícios financeiros para o seu investimento, os seguintes critérios de decisão são frequentemente utilizados: "Valor Presente das Rendas Líquidas" (VPL), "Valor Esperado da Terra" (VET), e, "Taxa Interna de Retorno" (TIR).

por várias perspectivas.⁴ Nestas circunstâncias, a obtenção de uma solução global, e que possa integrar todos os fatores relevantes do problema, é muito difícil, senão impossível. O tratamento destas estruturas complexas, entretanto, pode ser bastante facilitado através de sua abordagem pela perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas, como apresentado na sequência.

4.2. Sistemas, modelos e o processo de decisão:

4.2.1. Teoria geral de sistemas:

O vocábulo "Sistema" talvez seja uma das expressões mais largamente utilizadas na história contemporânea da investigação científica. Adicionalmente, o conceito de sistemas é também algo tão antigo quanto a própria história da civilização. Segundo VEMURI¹⁴⁶ (p.25) Aristóteles já havia indicado a essência do pensamento fundamental à Teoria dos Sistemas, ao afirmar que "(....) o todo é mais importante que as partes."

Uma definição encontrada em dicionários (FERREIRA⁶², p.1594), estabelece os seguintes significados alternativos para "Sistema" (S.m.):

⁴Uma discussão do caráter multidimensional do problema de determinação da "densidade ideal" de um povoamento florestal, ao longo do tempo, pode ser examinada na análise documentada por DAVIS⁴⁴: segundo aquele autor, "(....) este é um problema de difícil solução por que requer o conhecimento, a integração e a ponderação de considerações tanto biológicas como econômicas.

1. "conjunto de elementos, materiais ou idéias, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação;
2. disposição das partes ou dos elementos de um todo, coordenados entre si, e que funcionam como uma estrutura organizada;
- (....)
6. conjunto ordenado de meios de ação ou idéias, tendente a um resultado; plano, método; sistema de trabalho;"

Não é difícil se constatar que a noção de sistema é extremamente genérica e requer um raciocínio subjetivo e caracterizado por uma apreciação abstrata e reducionista da natureza (i.e., das dimensões, dos mecanismos de funcionamento, das relações implícitas e do grau de complexidade de sistemas, reais ou hipotéticos). Segundo esta ótica, um "Sistema" poderá ser, literalmente, qualquer coisa. Surpreendentemente, a realidade dos fatos é exatamente esta. Desde que os seus limites, a sua natureza assim como as suas características intrínsecas sejam adequadamente descritas, um "Sistema" pode ser definido como for mais apropriado para um estudo. Desta forma, os elementos que compõem um sistema devem ser estabelecidas de forma arbitrária e dependem, portanto, dos propósitos e das características específicas de um determinado estudo.

Apesar do fato de que alguns conceitos inerentes a "Sistemas" possam ser identificados nos primórdios da História da Civilização, foi somente neste século, após a II Guerra Mundial, que o "Enfoque Sistêmico" no tratamento de problemas se materializou como uma área específica de conhecimentos. Os estudos conduzidos pelo biólogo alemão Ludwig von Bertalanffy

(BERTALANFFY^{18, 19}), citado por CHIAVENATO³⁴, têm sido considerados como aqueles que efetivamente marcam o início dos esforços de pesquisa concreta na área. Outras contribuições de extremo valor para substanciar os conhecimentos desta área foram aquelas elaboradas por CHURCHMAN et al.³⁶, e, mais recentemente, por CHURCHMAN³⁷ e ACKOFF & SASIENI².

Em atividades de pesquisa, o enfoque de sistemas pode ser interpretado como uma metodologia integradora de recursos comprometidos na procura de novos conhecimentos, ou na adaptação daqueles já existentes, com o objetivo fundamental de descrever os "protótipos" do mundo real (PAEZ¹¹¹). Ainda segundo aquele autor o "Enfoque Sistemico" tem grande importância na solução dos problemas [gerenciais], uma vez que toma em consideração desde a identificação dos problemas, até a sua solução propriamente dita. Neste contexto, e sempre que for desejável propor uma solução adequada para um determinado problema, é fundamental a noção de que "problemas" devem ser examinados na sua plenitude e de forma completa.

Na atualidade, a "Teoria Geral dos Sistemas" firmou-se como parte essencial do tratamento de problemas de decisão. Desta forma, um "Enfoque Sistemico", é tão somente uma alternativa conceitual para se organizar e entender um problema de decisão, de uma maneira racional e objetiva. O conceito de "Modelos", como examinado na sequência, é, no entanto, não somente útil como também necessário para uma eficiente abordagem sistêmica dos problemas de decisão.

4.2.2. Modelos:

Depois que um "sistema" tenha sido identificado, definido e descrito adequadamente, existem duas possibilidades básicas para o seu tratamento analítico: primeiro, o "Sistema Real" pode ser manipulado diretamente; ou, segundo, o comportamento do sistema frente às intervenções, pode ser examinado através de um "Modelo". Um "Modelo" é uma representação simplificada de um sistema real ou hipotético. Sendo uma abstração da realidade, modelos podem ser classificados de acordo com a sua função, propósito, dimensão, ou até mesmo, segundo o grau ou intensidade de abstração. Refletindo a forma convencionalizada na literatura, DYKSTRA⁵² (p.6) identifica os seguintes tipos de modelos:

- a) Modelos Icônicos: são representações físicas de um sistema real, como, por exemplo, as esculturas, as miniaturas em escala, os mapas e as fotografias;
- b) Modelos Analógicos: são aqueles modelos que representam um sistema de "forma análoga", mas que não têm qualquer semelhança física com o sistema sendo representado. SPIECKER¹³⁷ (p.7) enfatiza que um Modelo Analógico é um equivalente físico da realidade que ele representa (i.e., um conjunto de propriedades representando um outro conjunto de propriedades). Como exemplo, podem ser citados os gráficos e fluxogramas;
- c) Modelos Simbólicos: estes modelos são inicialmente concebidos na forma de pensamentos abstratos de um sistema, e, na sequência, materializados através do uso de símbolos como em fórmulas químicas ou equações matemáticas. Na Engenharia Florestal, exemplos clássicos são as Equações de Volume, os Modelos (Funções) de Crescimento e de Produção, e, os Modelos para Planejamento Estratégico da Produção Florestal.⁵

⁵O Modelo de Otimização desenvolvido neste estudo é, na sua essência, um "Modelo Simbólico", mas que está fundamentado em um "Modelo Analógico" (Estrutura de Redes) e que representa os elementos mais essenciais do problema proposto.

Um modelo simbólico deve ser concebido e estruturado com aqueles fatores ou elementos componentes de um sistema, que sejam efetivamente relevantes para uma situação ou estudo específico, representando as relações de interesse da forma mais adequada.

Modelos simbólicos também podem ser classificados em "Modelos de Simulação" e "Modelos de Otimização", dependendo dos fins a que se destinam.

De uma forma genérica, simulação é o ato de se imitar o processo ao qual um determinado sistema pode ser submetido. PAEZ¹¹¹ indica que o vocábulo "simular" significa reproduzir os aspectos essenciais e o comportamento de um sistema, sem que exista a necessidade de duplicar a sua natureza [i.e. do sistema real sob estudo].

O tratamento de problemas de decisão através do uso de "Modelos de Simulação" é particularmente útil para se representar sistemas de grande complexidade estrutural e/ou funcional, ou quando não se dispõe de informações suficientes sobre um determinado sistema. Comparados aos "Modelos de Otimização", entretanto, os "Modelos de Simulação" podem incorporar muito mais detalhamento sobre as partes componentes de um sistema, das variáveis que o descrevem, assim como acerca de suas interações. Por este motivo, Modelos de Simulação podem ser refinados de forma contínua, acrescentando informações mais detalhadas, de modo que seja possível evoluir para uma representação cada vez mais acurada de um processo real. Em contraposição a estas vantagens, um Modelo de Simulação não é um instrumento de

otimização "a priori", mas tão somente uma ferramenta para análise e exploração. Qualquer intenção de se obter uma solução ótima para um determinado problema, através de simulação, deve considerar a necessidade de executar um processo lento de tentativa e erro até que se obtenha a convergência em direção à solução desejada.

O conceito de otimização, por outro lado, pode ser examinado como o ato de se obter "a melhor prescrição" sobre como um determinado sistema deve ser operado no contexto de um conjunto de condições especificadas. Aquele "Processo de Operação do Sistema" é representado matematicamente de tal maneira que as partes relevantes do sistema, assim como a forma da sua interdependência, são representados por meio de funções. Estas últimas, por sua vez, são consideradas de forma simultânea durante o processo de otimização. "Modelos de Otimização" são utilizados para descrever sistemas (ou problemas) bem definidos e adequadamente estruturados. Para elaborar tais modelos há que se coletar dados em quantidade e qualidade suficientes, assim como dispor de algoritmos adequados para cada caso, conforme seja a natureza do problema. Apesar das dificuldades e das limitações existentes na construção destes instrumentos de análise, Modelos de Otimização propiciam uma "solução ótima" e, por este motivo, os esforços dedicados ao seu desenvolvimento são crescentes. Na atualidade, o conceito de otimização está universalmente aceito como o princípio que reflete a essência dos procedimentos de análise quantitativa de diversos problemas de decisão acerca da

alocação de recursos escassos ou limitados. Este fato também é constatado na Engenharia Florestal, e, particularmente na solução de problemas em Manejo Florestal, no Brasil inclusive.

4.2.3. A silvicultura como um "Sistema de Produção de Madeira":

Aceitando-se a noção de que um sistema é um conjunto de componentes interrelacionados e que atuam de forma integrada, convém entender que sistemas também podem ser descritos segundo uma hierarquia de sub-sistemas. Ou seja, as partes componentes (i.e. os sub-sistemas), que constituem o sistema global, são interrelacionadas de forma dinâmica e com uma estrutura tal que o conjunto passa a ser mais importante do que as partes que o compõem. Eventualmente, entretanto, cada sub-sistema pode ser examinado de forma isolada e individual, segundo as suas próprias características e particularidades. Desta forma, na Engenharia Florestal, sistemas típicos podem ser facilmente identificados no exame do setor florestal como um todo, no gerenciamento de atividades em uma floresta inteira, nas decisões acerca de um povoamento florestal ou até mesmo no crescimento de uma árvore, quer esta seja examinada na sua individualidade ou não.

Em função do exposto, e segundo a perspectiva do Manejo Florestal, o crescimento de um Povoamento Florestal Homóclito Equiano, ao longo do tempo, pode ser apreciado segundo a ótica de um "Sistema de Produção de Madeira". Uma apreciação generalizada sugere que este "Sistema de Produção" tem uma origem (o plantio) e um destino (o corte final ou corte raso, na idade de rotação).

Entre aqueles dois pontos extremos, ao longo do tempo, existem amplas possibilidades para intervir no processo de crescimento ao qual o sistema (o povoamento florestal) está sujeito. Como já discutido anteriormente, a Silvicultura trata exatamente destas possíveis intervenções, i.e. os tratamentos silviculturais. O Manejo Florestal, por outro lado, estabelece a forma, a intensidade e a oportunidade para a realização daqueles tratamentos.

Este enfoque sistêmico na apreciação dos vários componentes que formam um "Sistema de Produção", implica, entretanto, em se considerar todos os fatores relevantes do sistema, de forma simultânea e integrada. Somente desta maneira, a decisão resultante poderá satisfazer a todas as condições em que aquele sistema deve ser operado.

Como enfatizado, o "Enfoque Sistêmico" implica na apreciação global dos elementos que integram um Sistema. Adicionalmente, segundo CHURCHMAN³⁷ esta forma para o tratamento dos problemas de decisão permite que sejam examinadas as relações de interdependência entre os elementos componentes de um problema.

Neste estudo, portanto, e segundo a ótica da Teoria Geral de Sistemas, deve-se documentar um exame dos fatores mais relevantes aos quais o Processo de Tomada de Decisões na operação de um "Sistema de Produção de Madeira" está subordinado, como apresenta-se na sequência.

4.3. Regimes silviculturais:

Uma vez que exista a intenção de se estabelecer um povoamento florestal com uma determinada espécie, sempre existirá a necessidade de se conceber (e praticar) um regime silvicultural apropriado. Este regime silvicultural (SMITH^{134,135}, EVANS⁵⁶), por vezes também denominado regime de manejo (CLUTTER⁴⁰, DAVIS & JOHNSON⁴⁶, BUONGIORNO & GILLESS²⁶), deverá incluir pelo menos os seguintes componentes:

- a) um espaçamento inicial (ou, de forma análoga, o número de mudas a plantar por unidade de área);
- b) um regime de desbaste;
- c) um regime de poda (necessário somente se houver interesse na produção de madeira livre de nós); e,
- d) uma idade para rotação.

Mesmo que um regime silvicultural não venha a ser formalmente concebido e documentado, como por exemplo em um "Plano de Manejo", tais operações são invariavelmente necessárias, e assim sendo estarão subordinadas a alguma forma de decisão.

A escolha de um espaçamento inicial entre mudas assim como o exame de aspectos inerentes à realização da poda (e a concepção de regimes de poda, integrados a algum regime de desbaste), não serão considerados neste estudo. Objetivando limitar a análise às decisões de corte (parcial ou total) de árvores em um povoamento florestal, este trabalho de pesquisa contemplou apenas a apreciação analítica sobre desbastes e corte raso (rotação). Entende-se que somente estes dois componentes de um regime

silvicultural formam um problema de decisão suficientemente complexo para justificar que atenção seja exclusivamente a eles dedicada. Ademais, sabe-se que depois que as mudas tenham sido plantadas em definitivo no campo, os desbastes e o corte raso são a forma mais eficiente que um proprietário florestal pode dispor para influenciar tanto na qualidade como na quantidade da produção de madeira.⁶

4.4. Regimes de desbaste:

O exame dos estudos em produção florestal conduzidos no Brasil, revela o fato de que os esforços foram direcionados quase que exclusivamente para a determinação da idade de rotação: a produção parcial e intermediária resultante da realização de desbaste(s) sempre foi simplesmente ignorada ou assumida como que "constante". Desta maneira, nos poucos estudos que incorporaram desbastes (como por exemplo, FABER et al.^{5a}, RIBAS^{11a}, OHLSON & DUARTE^{10a}, EMERENCIANO^{5a}), a sua realização foi considerada fixa em determinadas idades e/ou intensidades. Nestes casos, a única variável efetivamente considerada foi a idade de realização do corte raso ou corte final. A omissão da possibilidade de se realizar desbaste(s) segundo regimes alternativos, e portanto, a desconsideração pelos custos e receitas intermediárias durante a rotação, certamente tem propiciado resultados que não são

⁶Certamente, no entanto, a concepção e a implementação de um regime de poda adequado poderão contribuir substancialmente para a produção de madeira de elevado valor comercial, i.e. madeira livre de nós, se este for um dos objetivos para a produção.

compatíveis com a prática da silvicultura de muitas espécies florestais, como por exemplo aquelas do gênero *Pinus*, ou seja: uma análise global revela que, no Brasil, a pesquisa tem sido polarizada, refletindo a realização de esforços direcionados de forma exclusiva para a pesquisa em desbastes ou, de maneira alternativa, apenas para os estudos sobre a idade de rotação. As possibilidades para a integração dos esforços de pesquisa, de tal modo que uma solução simultânea fosse produzida, como requer a efetiva solução dos problemas, não têm sido devidamente exploradas.

4.4.1. Conceitos:

Denomina-se "desbaste" à operação de corte pela qual se reduz o número de árvores em um povoamento florestal (EVANS⁵⁶, p.276). Um programa ou regime de desbastes é, portanto, uma série de intervenções na vida de um povoamento florestal objetivando a redução da sua densidade (avaliada em termos de "área basal" ou "número de árvores por unidade de área") com o propósito de maximizar o valor líquido da madeira removida, durante toda a rotação (SMITH¹³⁵, p.50). Dentre os fatores que determinam o valor da madeira estão a quantidade, a qualidade e as dimensões das toras, assim como os custos da sua exploração e aqueles do seu posterior processamento.

Frequentemente, a seleção das árvores a favorecer, ou a cortar, em um desbaste, é baseada em três fatores principais:

- a) a posição relativa das árvores e a condição da sua copa;
- b) as condições fitossanitárias; e,
- c) as características do tronco e a sua qualidade.

Aspectos relativos às condições de fitossanidade das árvores, assim como aqueles referentes às características desejáveis do tronco de árvores, não serão descritos neste estudo. Devido à sua importância para as decisões em desbaste, no entanto, a forma convencionada na atualidade para a classificação das árvores que compõem um povoamento florestal deve ser obrigatoriamente examinada.

Os fundamentos teóricos e conceituais implícitos à prática dos desbastes estão associados ao desenvolvimento natural de um povoamento florestal homóclito equiano. Em condições naturais, após a germinação das sementes, um elevado número de mudas estarão estabelecidas por unidade de área. Durante o crescimento das mudas e da sua gradual transformação em árvores, ao longo do tempo, deverá acontecer uma intensa competição, entre os indivíduos, pelos fatores do crescimento: água, luz e nutrientes. Neste processo de crescimento, indivíduos mais fracos são progressivamente superados pelas árvores mais fortes e melhor adaptadas às condições edafo-climáticas existentes. Em algum momento, árvores suprimidas em consequência à competição têm as suas copas reduzidas a proporções tais que a morte destes indivíduos será inevitável. Durante todo este processo, deverá

ocorrer uma diferenciação das árvores segundo "classes de copas".

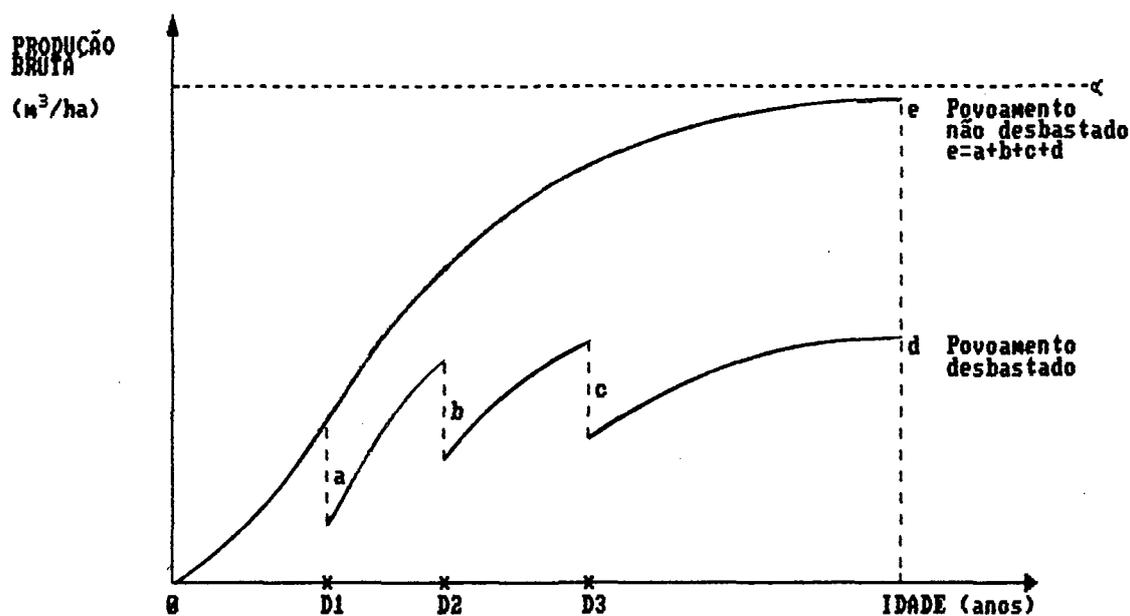
Na atualidade, a classificação aceita universalmente (SMITH¹³⁵, p.46-50, EVANS⁵⁶, p.267-8), preconiza que as árvores que compõem um povoamento florestal poderão pertencer a uma das seguintes classes: dominantes, co-dominantes, intermediárias e dominadas (ou suprimidas). Apesar de que esta classificação seja baseada em critérios qualitativos, e, portanto, subjetivos, esta é fundamental para a prática dos desbastes.

Diversos estudos têm sido conduzidos no Brasil com o propósito de verificar (e algumas vezes quantificar) os efeitos dos desbastes sobre o crescimento e sobre a produção de povoamentos florestais assim como sobre as árvores que o compõem. O número de variáveis examinadas em diferentes estudos tem sido bastante elevado, e a sua natureza extremamente diversa, entretanto. Como consequência imediata, observa-se que muito embora as "tendências" do comportamento resultante à aplicação dos tratamentos, sejam semelhantes, em diferentes estudos (de árvores individuais assim como de povoamentos florestais, a nível de unidade de amostra experimental), a extensão dos seus efeitos e a sua magnitude absoluta raramente podem ser extrapoladas para outras condições que não aquelas específicas da área experimental.

Segundo CLUTTER⁴⁰ (p.68) os efeitos da variação da densidade de um povoamento florestal sobre o seu crescimento em volume ou em área basal têm sido inconsistentes. Tal fato deve-se ao possível confundimento de tais efeitos com a idade em que os

tratamentos foram aplicados e/ou avaliados. Da mesma forma, a definição dos limites de comercialização utilizados (diâmetros limite para utilização comercial das toras, por exemplo), pode ter uma influência definitiva nos resultados por vezes diferentes ou conflitantes.

Apesar desta inconsistência observada nos resultados de diferentes experimentos de desbaste, uma tendência generalizada de comportamento é apresentada na Figura 1: em um povoamento florestal não desbastado, a produção bruta por unidade de área, a longo prazo, é aproximadamente igual à produção total que seria obtida pelo valor acumulado das produções intermediárias (desbastes) acrescido da produção obtida no corte final, se o mesmo tivesse sido submetido a um regime de desbastes. SPURR¹³⁸ (p.296-8) reporta alguns resultados experimentais que comprovam aquele fato, em diferentes estudos. Na literatura florestal este fenômeno é tradicionalmente conhecido como "Teoria de Mar:Möller", ou, simplesmente "Teoria de Möller". Desta forma, os resultados observados na grande maioria dos estudos sobre desbaste suportam a conclusão geral de que tais intervenções não afetam significativamente a produção bruta total em volume por hectare, exceto em condições extremas de densidade (quando, devido à baixa densidade, o sítio é sub-utilizado durante algum tempo, ou quando a densidade excessiva conduz as árvores a uma competição por luz, água e nutrientes).



(o valor assintótico de máxima produção é indicado por α)
(D1, D2, e D3 indicam, respectivamente, um primeiro, um segundo e um terceiro desbastes.)

FIGURA 1. PRODUÇÃO BRUTA DE MADEIRA EM POVOAMENTOS FLORESTAIS DESBASTADOS E NÃO DESBASTADOS.
(segundo CLUTTER et al.⁴⁰, p.70)

Decisões são necessárias para diversos aspectos da prática dos desbastes. Certamente a primeira indagação a ser feita é sobre a real conveniência em se efetivamente realizar algum desbaste. Eventualmente, como identificado por AHRENS⁴, a necessidade de se realizar desbastes pode ser questionada. Este é o caso, por exemplo, da produção de madeira para celulose, ou seja: quando existe somente o interesse de se maximizar a produção volumétrica, ou, por vezes, a produtividade, sem qualquer preocupação quanto às dimensões das toras. Sempre que um povoamento florestal deva ser submetido a desbastes, entretanto,

será preferível que um "Regime de Desbastes" seja previamente concebido.⁷ Isto se faz necessário na produção de toras para processamento mecânico, ou, na produção de madeira para usos múltiplos. Em qualquer caso, três decisões fundamentais deverão ser invariavelmente tomadas: quanto, como e quando desbastar? A elucidação destas questões técnicas não é uma atividade trivial, como bem caracteriza a rica e extensa literatura nesta área de conhecimentos.

4.4.2. Métodos de desbaste:

Desbastes são caracterizados através de critérios como "método" (ou tipo), "grau", e "intensidade". Este último critério é descrito pela definição do "ciclo" e do "peso" do desbaste. Neste estudo entende-se que a definição do método de desbaste seja suficiente para descrever a essência da operação: a razão de ser dos demais critérios, assim como a sua utilidade, podem ser examinadas nos trabalhos de revisão reportados por CARNEIRO²⁸, BURGER²⁷, VALE et al.¹⁴⁴ e SCHNEIDER¹²⁷. Muito embora alguns estudiosos sobre o tema, no Brasil, ainda façam referência ao grau, ciclo e peso de desbastes, pode-se constatar uma tendência de não mais se utilizar aqueles critérios descritivos na prática contemporânea da silvicultura.

⁷Conforme enfatizado por SMITH¹³⁵ (p.117), na ausência de um "Regime de Desbastes", sempre existe uma tendência em se desbastar aquém do necessário, principalmente quando as árvores marcadas são aquelas por abater. Segundo aquele autor, um desbaste parece ser muito mais severo após a marcação das árvores do que após o seu abate propriamente dito.

Quanto ao método ou tipo de desbaste as várias formas alternativas com que a operação pode ser realizada são atualmente reunidas em três categorias básicas: a) Desbaste Seletivo, b) Desbaste Sistemático, e, c) Desbaste Livre. A discussão apresentada na sequência foi elaborada após consultar as obras documentadas por SMITH^{134.135}, SAVILL & EVANS¹²⁸, EVANS⁵⁸, SHEPHERD¹³¹, DANIEL et al.⁴³. Outros autores como BURGER²⁷ e SCHNEIDER¹²⁷ também foram considerados.

a) Desbaste Seletivo: quando as árvores são abatidas após a aplicação de algum critério qualitativo que as identifique. Alternativamente, pode-se também identificar aquelas árvores que deverão permanecer formando o povoamento florestal remanescente ao desbaste. A literatura reconhece pelo menos duas subcategorias para desbaste seletivo: desbaste por baixo (ou Método Alemão) e desbaste pelo alto (ou Método Francês), dependendo se as árvores abatidas são predominantemente das classes inferiores ou superiores, respectivamente. As árvores que se procura favorecer, em ambos os casos, no entanto, são essencialmente as mesmas: árvores dominantes, saudáveis e cujo tronco seja livre de imperfeições ou defeitos.

O "Desbaste Seletivo Por Baixo" nada mais é do que uma antecipação à mortalidade natural das árvores que compõem um povoamento florestal. A lógica intrínseca a este método é bastante simples: deve-se remover, em desbastes sucessivos, aquelas árvores que fatalmente seriam dominadas e que, portanto,

seriam eliminadas naturalmente, em diferentes fases do desenvolvimento do povoamento. Em um desbaste "por baixo" são removidas as menores árvores e aquelas de menor vigor, de tal modo que o futuro incremento é concentrado nas melhores árvores, de crescimento mais rápido e com melhor forma de tronco. Segundo JOHNSTON et al.⁸³ o método permite que se obtenha o máximo crescimento potencial de um sítio, e, no longo prazo, dentre todos os métodos, este é aquele que propicia o maior retorno monetário (na atualidade, entretanto, esta última afirmativa não pode ser generalizada). O método é de fácil aplicação prática e, por esta razão, é também muito popular.

O "Desbaste Seletivo Pelo Alto", implica no abate e remoção de árvores preferencialmente localizadas nos estratos dominante e co-dominante do povoamento. Por este motivo, são retiradas muitas árvores de grandes dimensões o que conduz à produção antecipada de uma renda monetária de maior valor do que aquela produzida quando se desbasta seletivamente "por baixo". Em um desbaste "pelo alto" a maior parte das árvores intermediárias e dominadas deverão remanescer à operação. A aplicação do método prevê a marcação de algumas árvores dominantes e co-dominantes, que devem permanecer após o desbaste, e que irão formar o povoamento por ocasião do corte final. Por estes motivos, este método propicia maior flexibilidade que o desbaste "por baixo", mas, pelas mesmas razões, a sua aplicação prática demanda uma maior habilidade e competência profissional.

b) Desbaste Sistemático: quando as árvores são abatidas segundo um procedimento sistemático no qual tanto a qualidade das árvores como a sua posição relativa no povoamento não são levadas em consideração. Em um desbaste sistemático somente a intensidade poderá ser variável. O caráter de sistematização do desbaste é definido pela remoção de árvores em linhas de plantio, em diagonais (quando o espaçamento é perfeito e regular) ou segundo algum critério de espaçamento (abate de cada n-ésima árvore, por exemplo). Segundo SMITH¹³⁵ (p.101), este método tem sido, por vezes, também denominado "Desbaste Geométrico" ou "Desbaste Mecânico".⁸

c) Desbaste Livre: quando o desbaste é realizado pela combinação de quaisquer outros métodos de desbaste. Esta é a forma com que, frequentemente, no Brasil, o primeiro de uma série de desbastes é realizado, ou seja: realiza-se um "Desbaste Sistemático", removendo cada terceira ou quarta linha de plantio, complementado, imediatamente, com um "Desbaste Seletivo" nas linhas remanescentes.

Muito embora não seja propriamente um "Método de Desbaste", a noção de "Desbaste Pré-Comercial" é particularmente relevante para este estudo. Em analogia ao conceito geral de "Desbaste", apresentado anteriormente, um "Desbaste Pré-Comercial" é aquela

⁸A expressão "Desbaste Mecânico", entretanto, não implica, necessariamente no uso de equipamentos "mecanizados" para a realização do desbaste, mas tão somente à "forma mecânica" com que as árvores são identificadas para abate.

operação de corte de árvores em povoamento florestal, realizado em algum momento intermediário durante a rotação, produzindo um determinado volume de madeira para o qual não existe mercado, ou pelo menos, um volume de madeira para o qual não exista um valor que justifique a sua comercialização. Um desbaste pré-comercial, entretanto, tem um custo associado à sua realização, ou seja: esta forma de realização de um desbaste deve ser obrigatoriamente tratada como um investimento que se faz no povoamento florestal (remanescente ao desbaste). Quando realizado em idade precoce, entretanto, (i.e. durante os primeiros anos da vida de um povoamento), a redistribuição do potencial de crescimento, entre as árvores remanescentes irá acelerar o crescimento destas em diâmetro, e, portanto, em volume e possivelmente em valor.

Convém ressaltar que todos os métodos de desbaste apresentados referem-se a uma operação em particular, em um determinado momento ao longo da rotação (SMITH¹³⁴, p.89). Um programa, ou regime de desbastes, é, na verdade, uma sequência de operações de desbaste, mas, frequentemente, classificados segundo diferentes métodos, como descrito.

Outros métodos ou tipos de desbaste também podem ser identificados na literatura. Entende-se, no entanto que a sua descrição detalhada não é relevante para a pesquisa desenvolvida neste estudo. Somente para fins de registro, portanto, menciona-se a existência das seguintes variações para desbaste seletivo: Desbaste das Dominantes (ou, Desbaste de Borgreve), Desbaste Pró-Selecionadas e Método Inglês de Desbaste (ABREU¹), dentre

outros. Uma descrição detalhada de alguns destes métodos pode ser também encontrada nos trabalhos de CARNEIRO²⁶, BURGER²⁷, VALE et al.¹⁴⁴ e SCHNEIDER¹²⁷.

4.4.3. Critérios para a realização de desbastes:

Em adição aos métodos de desbaste, convém mencionar também a existência de diferentes critérios para a determinação da intensidade e/ou idade em que os desbastes podem ser realizados. Na sua essência estes critérios tratam do controle da densidade populacional ao longo do tempo. Tais critérios podem ter uma base bastante empírica, como por exemplo o conceito de "D+x" (SMITH¹³⁴ p.104), ou o método de "Diâmetro Futuro" (VEIGA¹⁴⁵). Por outro lado, existem também critérios que se fundamentam em conceitos dendrométricos bastante elaborados como por exemplo o "Índice de Espaçamento Relativo de Hart-Becking" (FISHWICK⁶⁴, BURGER²⁷), o "Fator K de Magin" (SCHNEIDER¹²⁷), o Índice de Densidade de Reineke" (HUSCH et al⁸¹, p.342), e a "Área Basal Limitante" (ASSMAN¹⁰), para citar somente alguns dos diversos procedimentos documentados na literatura.

Muito embora diferentes critérios tenham sido propostos na literatura, ao longo da história da Engenharia Florestal, o uso integrado da idade e do número de árvores por hectare (N/ha) é certamente aquele de mais fácil aplicação prática. O controle, ou monitoramento, de programas de desbaste ao longo da rotação, é também bastante simplificado com o uso deste critério. Desta forma, a prática de execução de desbastes, em países do

hemisfério sul, como, por exemplo, na África do Sul, Austrália, Chile e Nova Zelândia, e, particularmente, no Brasil, implica em uma marcação prévia das árvores selecionadas para o abate. O critério adotado por muitas empresas florestais, no Brasil, é o número de árvores a remover por ocasião de um desbaste, ou, alternativamente, o número de árvores que devem permanecer após o desbaste, formando o povoamento florestal remanescente. Este procedimento é com frequência adotado com o propósito de simplificar o trabalho das equipes de marcação de desbaste, assim como diminuir os custos das atividades de exploração.

O elevado número de contribuições técnico-científicas sobre o estudo de diferentes aspectos de desbaste, e o fato de que tais estudos continuam sendo concebidos e implementados no Brasil, evidenciam o fato de que não existe uma solução genérica adequada e passível de aplicação universal, mesmo quando se considera somente uma única espécie. Apesar do progresso técnico observado no Brasil até o momento, nesta área da Engenharia Florestal, as evidências indicam que a investigação sobre desbastes continuará sendo desenvolvida, e de forma cada vez mais intensa. Considerando a distribuição do recurso formado por plantações florestais de *Pinus* sp., por classes de idade, pode-se afirmar que a demanda por tecnologias para a prática racional dos desbastes é plenamente justificada, crescente e irreversível.

4.5. Rotação:

4.5.1. Conceitos:

Denomina-se rotação ao período de tempo necessário para que as mudas estabelecidas em uma plantação florestal (e as árvores que assim venham a ser formadas ao longo do tempo) possam atingir determinada condição financeira ou de maturidade natural (SMITH¹³⁴, p.5). De uma forma mais simples e direta, EVANS⁵⁶, p.306) define rotação como o período de tempo, em anos, entre o plantio de mudas e o corte final das árvores produzidas em uma plantação florestal.

A "Rotação" tem sido tradicionalmente tratada como um dos elementos mais essenciais tanto para o manejo como para a silvicultura de plantações florestais. Conforme enfatizado por LEUSCHNER⁹⁵ (p.169) a magnitude da rotação determina as dimensões, a quantidade e a qualidade da madeira produzida.⁹ Desta forma, para uma determinada área total disponível, visando o estabelecimento e/ou a manutenção de um certo recurso florestal (i.e., uma floresta), a rotação irá determinar a área parcial que poderá ser submetida a corte-raso, anual ou periodicamente. As necessidades de preparo do solo e as operações de plantio e de manutenção das plantações, ao longo do tempo, ficarão também

⁹Por "Qualidade da Madeira" deve-se entender o conjunto de características da madeira que indicam a sua capacidade de satisfazer requisitos pré-estabelecidos para a sua utilização. Na sua essência, aquelas características podem ser avaliadas tanto pela qualidade intrínseca da madeira propriamente dita como pela forma e dimensões das toras.

condicionadas ao conhecimento da rotação a ser utilizada. As possibilidades para a "Regulação da Produção", e assim também a distribuição dos povoamentos florestais em classes de idade, em uma floresta, serão igualmente afetadas pela escolha, ou pela definição, de uma ou mais idades para rotação.

É oportuno enfatizar também que, tradicionalmente, a escolha de uma rotação é realizada somente depois que um programa de desbastes tenha sido estabelecido. Em contraste a este procedimento convencional de análise, o propósito deste estudo foi o de solucionar o problema de definição de um regime de desbastes, assim como da melhor Rotação, simultaneamente.

4.5.2. Tipos de rotação:

Ao examinar a literatura pertinente a esta questão técnica, FENTON⁶⁰ identificou cinco tipos básicos de rotação. Em seus comentários acerca daquele estudo, EVANS⁵⁶ caracterizou cada tipo de rotação como resumidamente é apresentado na sequência:

a) Rotação Física: determinada pelas condições de sítio ou por outros fatores ambientais que possam impossibilitar que as árvores alcancem a sua maturidade biológica (por exemplo, o ataque generalizado de insetos ou doenças, ou a ocorrência de incêndios ou de temporais).

b) Rotação Silvicultural: aquela que permite a mais fácil e eficiente regeneração natural. A adoção deste tipo de rotação, no

entanto, deve ser desencorajada, uma vez que, frequentemente, o estabelecimento de uma segunda plantação por meio de mudas selecionadas, em um mesmo local, propicia diversas vantagens como, por exemplo, o controle do material genético utilizado e possibilidades para a preparação do solo. Estas medidas certamente contribuem para permitir que as árvores tenham um crescimento mais intenso, produzindo, também um povoamento mais homogêneo.

c) Rotação Técnica: tempo necessário para a produção de toras com determinadas dimensões especificadas (máximas ou mínimas), objetivando satisfazer as necessidades de uma utilização em particular.

d) Rotação da Máxima Produção Física Anual: esta é a idade em que ocorre o máximo valor para o Incremento Médio Anual (IMA) em volume de madeira por unidade de área. Em analogia ao objetivo histórico (porém, na atualidade, questionável) de se alcançar e manter perpetuamente, um determinado nível de produção em uma "Floresta", esta rotação é aquela que propicia o equivalente "Rendimento Sustentado" (em termos de volume de madeira por unidade de área) a nível de um povoamento florestal. No entanto, conforme enfatizado por DAVIS⁴⁵, quando considerações financeiras devem ser também apreciadas, esta idade de rotação será apenas indiretamente relacionada à idade na qual as árvores de maior valor comercial estarão disponíveis para corte.

e) Rotação Financeira: é aquela rotação que irá produzir o mais elevado retorno financeiro, para um determinado conjunto de circunstâncias. A análise financeira poderá ser feita segundo métodos alternativos, como por exemplo, Valor Presente das Rendas Líquidas (VPL), Valor Esperado da Terra (VET), Taxa Interna de Retorno (TIR) ou a aplicação do conceito de "Maturidade Financeira".¹⁰ Ressalte-se, entretanto que para um mesmo conjunto de fatores, e que caracterizam uma situação específica, a utilização de diferentes métodos poderá conduzir o analista a resultados igualmente diferentes.

4.5.3. Critérios para a determinação da Rotação:

Os diversos critérios propostos em literatura para se determinar a rotação foram relatados por KNUCHEL⁹⁰ e DAVIS⁴⁵, e mais recentemente por HANN & BRODIE⁷³, LEUSCHNER⁹⁵, DAVIS & JOHNSON⁴⁸ e NEWMAN¹⁰². A apreciação relatada na sequência é uma síntese das discussões apresentadas por aqueles autores, enriquecida com comentários identificados em outras contribuições relevantes para o tema, quando pertinente. Uma vez que o conceito de "Rotação Financeira" (também chamada "Rotação Econômica") é

¹⁰O conceito de "Maturidade Financeira", proposto por DUERR et al.⁴⁸, e posteriormente examinado por FEDKIW & YOHO⁶⁹ e BENTLEY & TEEGUARDEN¹⁸ incorpora noções de Análise Marginal: um povoamento estaria "financeiramente maduro" quando a sua taxa de crescimento marginal se igualasse à taxa alternativa de retorno para o capital investido. De uma maneira geral, no entanto, e conforme enfatizado por GREGORY⁷⁰ (p.285), todos os métodos têm como propósito determinar "quando" um povoamento alcançou a sua maturidade financeira. Existem muitas dificuldades, no entanto, em se incorporar a realização de desbastes na análise quando se tenta aplicar o conceito de "Maturidade Financeira".

particularmente relevante para este estudo, os critérios tradicionalmente utilizados para a sua determinação serão examinados com mais detalhamento. Convém ressaltar que, independente da definição que possa ser adotada para Idade de Rotação, todos os critérios tem como propósito maximizar alguma coisa. Obviamente, o critério mais apropriado para uma situação em particular depende dos objetivos que tenham sido estabelecidos para a produção florestal.

a) Dimensões do produto final:

Proprietários florestais que adotam este critério para definir a rotação, assumem que o objetivo da silvicultura seja permitir o crescimento das árvores até que estas alcancem determinado diâmetro e/ou altura (por causa dos diâmetros e comprimentos das toras que se deseja obter). A rotação será equivalente ao tempo necessário para que as árvores de um povoamento florestal atinjam as dimensões desejadas. No Brasil, este tem sido o critério adotado em algumas Florestas Nacionais, e até mesmo por diversas empresas florestais, pelo menos a nível de planejamento documentado, e de utilização interna, em muitas organizações.

b) Culminação do Incremento Médio Anual em Volume (IMA):

Este será o número de anos necessários para que se obtenha o máximo valor para o Incremento Médio Anual (IMA) em volume de madeira por unidade de área. Este momento, ao longo do tempo,

será aquele em que ocorre a interseção entre as curvas do IMA e do ICA (Incremento Corrente Anual). O uso desta rotação tem sido frequentemente sugerido porque desta forma permite-se a utilização do sítio em seu máximo potencial. Este conceito alternativo para rotação, entretanto, não incorpora qualquer consideração financeira (i.e., custos de produção, e, receitas que venham a ser obtidas). Os trabalhos reportados por FERNANDES⁶¹ e FERREIRA & TIMONI⁶³ exemplificam o uso deste critério. A Figura 2 apresenta a forma generalizada com que aqueles atributos de um povoamento florestal estão relacionados.

c) Rendas Líquidas Anuais:

Segundo NEWMAN¹⁰², este critério, é também conhecido pela denominação "Forest Rent" (ou Renda Florestal). O critério indica como rotação ótima aquela idade que propicia o máximo valor para a receita líquida média anual, segundo o resultado obtido pela aplicação da seguinte fórmula:

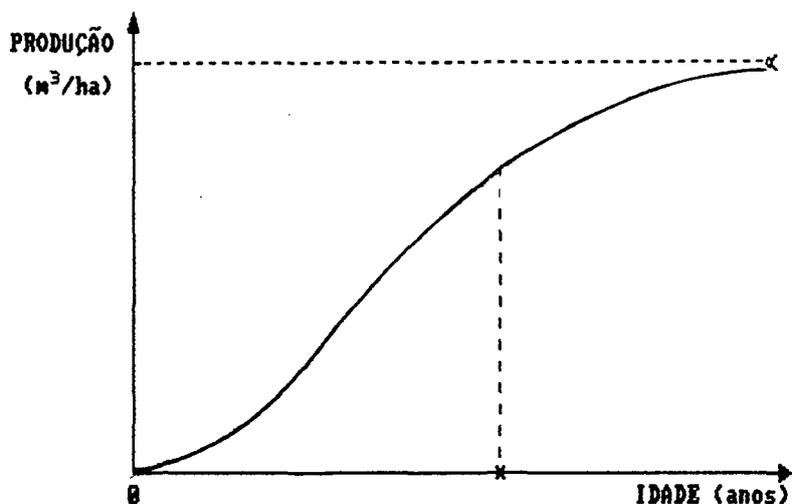
$$RLA_R = (RT_R - CT_R)/R \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde:

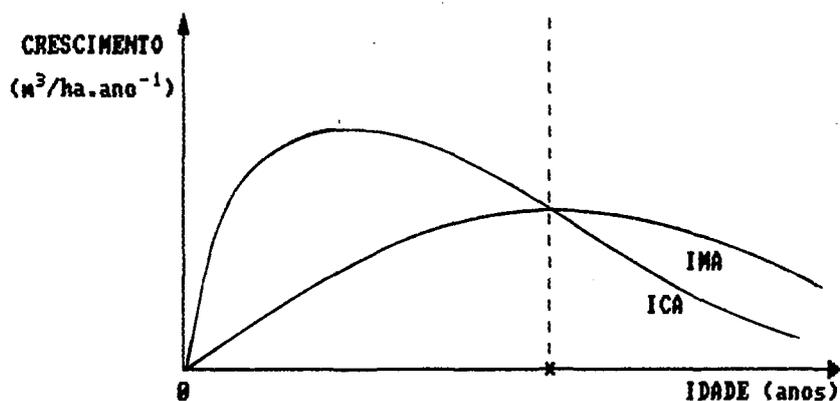
RLA_R = Receita Líquida Anual, à idade R.
 RT_R = Receita Bruta Total, descontados os custos de exploração, se o povoamento fosse integralmente abatido à idade R.
 CT_R = Custos Totais de Produção até a idade R. (acumulados em seu valor absoluto)

Esta fórmula deve ser aplicada anual ou periodicamente, até que se determine um valor máximo para o seu quociente.

O objetivo implícito ao critério é o de se maximizar a "Receita Líquida Média". Somente os custos operacionais são



(a) Curva do Crescimento Cumulativo ou Curva de Produção.



(b) Curvas do Incremento Médio Anual (IMA) e do Incremento Corrente Anual (ICA).

α indica o valor assintótico para a Curva de Produção.
 * indica a idade em que ocorre o máximo IMA.

FIGURA 2. CURVA DO CRESCIMENTO CUMULATIVO (a) E CURVAS DO INCREMENTO MÉDIO ANUAL - IMA E DO INCREMENTO CORRENTE ANUAL - ICA (b) PARA POVOAMENTOS FLORESTAIS HOMÓCLITOS EQUIANO.
 (modificado após HUSH et al.⁸¹, e, AVERY & BURKHART¹¹)

considerados. Nem o custo da terra, nem uma taxa de juros são incorporados à análise.

Conforme a descrição apresentada por NEWMAN¹⁰² este critério assume que não existe custo para a aquisição da terra (para viabilizar o estabelecimento da plantação florestal), e que aquele seria supostamente adicionado aos custos operacionais que seriam por sua vez recuperados nas receitas geradas pelo corte das árvores ao final da rotação (está implícita, desta forma, a necessidade de uma floresta total e perfeitamente regulada; i.e. uma floresta em que se produziria o mesmo volume de madeira, anualmente. Neste caso, qualquer área seria replantada imediatamente após o corte das árvores. Esta seria uma "floresta Perpétua".).

Ainda segundo Newman, entretanto, a suposição é totalmente equivocada porque não reconhece que a decisão de investimento na aquisição da terra para o primeiro plantio de mudas é totalmente independente da decisão acerca do corte final, à idade de rotação. Afirmar que a terra irá continuar vinculada a um sistema de produção de madeira não é sinônimo da afirmativa de que não existe um custo de oportunidade a ela associado. Segundo aquele autor, o principal defeito daquela suposição é o de ignorar a descapitalização das futuras receitas, evitando assim a sua comparação aos custos incorridos no momento presente.

d) Taxa Interna de Retorno (TIR):

Este critério é determinado para uma rotação única e baseia-se na análise de um fluxo de caixa (custos e receitas com momento de ocorrência conhecida ao longo de um horizonte de planejamento, i.e. uma rotação.). O fluxo de caixa deve ser descapitalizado, ou descontado, para o momento presente ou início do Horizonte de Planejamento. A Taxa Interna de Retorno é definida como aquela taxa de desconto que faz o Valor Presente das Rendas Líquidas de um projeto ser nulo. Em termos matemáticos, a TIR é o ótimo valor para "i", digamos "i*", tal que ocorra a seguinte igualdade:

$$\sum_{t=0}^R V_t / (1+i^*)^t = 0 \quad (\text{eq. 4.2})$$

onde:

V_t = Valor monetário (custo ou receita) com ocorrência no momento (ano) "t".

R = Idade de Rotação.

Esta fórmula deve ser aplicada para cada um dos regimes considerados em uma análise, selecionando-se, ao final, aquele regime que propicia o mais elevado valor para "i*".

O método da Taxa Interna de Retorno assume que o capital, e não a terra, é o fator fixo de produção. Desta forma, o procedimento retorna todas as receitas líquidas ao capital investido, maximizando a taxa de retorno sobre aquele investimento. Segundo NEWMAN¹⁰², este método tem implícita em si a suposição ou condição de que as receitas podem ser reinvestidas a esta taxa máxima (TIR), em perpetuidade.

Apesar do fato de que este método é relativamente bem aceito

como critério para análise de investimentos, a sua aplicação para se definir a idade de Rotação apresenta duas limitações importantes, como indicado por LEUSCHNER⁹⁵. Primeiro, o problema de raízes múltiplas (o mesmo problema pode ter duas idades ótimas de rotação). Em segundo lugar, não existe uma fórmula facilmente tratável e que permita a rápida determinação da TIR: este fato implica na necessidade de cálculos iterativos. NEWMANN¹⁰² indica ainda uma limitação de natureza básica e conceitual para o método: a maximização da TIR assume que a quantidade de terra é ilimitada, e que o acesso ao capital, no mercado, é impossível. O critério implica, portanto, na suposição que as receitas serão sempre reinvestidas no investimento original.

e) Renda líquida descontada para uma rotação única:

Este talvez seja o critério mais aceito e utilizado nas decisões sobre rotação, tanto em Silvicultura como em Manejo Florestal (LEUSCHNER⁹⁵). Também denominado "Método do Valor Presente", o critério objetiva identificar a rotação que permite maximizar o valor presente das rendas líquidas (i.e., descontadas a partir da sua ocorrência ao longo de todo um fluxo de caixa). O critério considera todas as receitas e todos os custos, correntes e futuros, assim como o valor do dinheiro (capital) no tempo.

As duas diferenças fundamentais entre este método e o "Valor Esperado da Terra" (descrito na sequência) são sumarizadas como segue: primeiro, o método do Valor Presente pode incluir o custo inicial da terra, e pressupõe a sua venda imediatamente após o

corde das árvores, à idade de rotação; e, segundo, neste método a análise é realizada para uma única rotação.

O Valor Presente Líquido é definido como a soma do Valor Presente das Receitas menos a soma do Valor Presente dos Custos (DAVIS & JOHNSON⁴⁶, p.270). A fórmula sugerida por aqueles autores para a determinação do critério é apresentada como segue:

$$VPL = \sum_{t=1}^R [RB_t / (1+i)^t] - \sum_{t=1}^R [C_t / (1+i)^t] \quad (\text{eq. 4.3})$$

onde:

VPL = Valor Presente das Rendas Líquidas.

RB_t = Receita Bruta com ocorrência no momento t.

C_t = Custos verificados no momento t.

R = Idade de Rotação.

f) Renda líquida descontada para uma série contínua e infinita de rotações:

Este critério foi originalmente desenvolvido em 1813 por Gottlob König, mas foi também examinado posteriormente por Martin Faustmann em 1849. Por este motivo a fórmula é por vezes também denominada como sendo a de "König-Faustmann". Em decorrência das razões que originalmente motivaram a sua proposição, no meio florestal este critério é melhor conhecido por "Valor Esperado da Terra" (VET).¹¹

¹¹Segundo GREGORY⁷⁰ (p.286) o critério foi proposto por Martin Faustmann como uma solução para o problema de Valoração de terras com cobertura florestal, objetivando o cálculo de um imposto sobre a propriedade. LINNARD⁸⁶, entretanto, após examinar o trabalho de Faustmann, indica que a formulação do critério foi elaborada com o propósito de determinar um valor compensatório justo para proprietários florestais em virtude da desapropriação de áreas pelo Estado objetivando a sua conversão para agricultura.

Segundo NEWMAN¹⁰², este é o melhor critério para se determinar a rotação por causa de algumas razões fundamentais:

- a) Assume-se que o sítio será utilizado em perpetuidade para a produção florestal. Desta forma, fica implícita ao critério a preocupação de que decisões tomadas no momento presente podem ter consequências no futuro;
- b) O critério considera o uso de todos os fatores que entram em um fluxo de caixa de acordo com os preços de mercado, e permite que quaisquer receitas em excesso sejam tratadas como uma remuneração para a terra;
- c) A idade de rotação será ótima quando o "Valor do Produto Marginal" (por se deixar as árvores que integram um povoamento florestal, em pé, por mais um ano) for igual ao custo de se dispor daquelas árvores por mais um ano (*) acrescido do custo de se deter a propriedade da terra (**):

(*) = quantidade de juros (\$) que poderia ser obtida pela exploração e venda da madeira, investindo a receita obtida por mais um ano, à taxa de juros de mercado.

(**) = quantidade de juros (\$) perdida por se postergar por um ano a receita advinda da eventual realização do corte raso.

A estrutura da "Fórmula de König-Faustmann", conforme a expressão proposta por DAVIS & JOHNSON⁴⁶ (p.499), é sumarizada da seguinte forma:

$$VET_R = RLR / (1+i)^R - 1 \quad (\text{eq. 4.4})$$

onde:

VET_R = Valor Esperado da Terra, para um ciclo perpétuo de rotações, cada qual com R anos.

RLR = Receita Líquida (\$), na idade de rotação R.

$$RLR = (V_R \cdot P_R) - \{ [a(1+i)^R - 1] / i \} - C(1+i)^R$$

V_R = Volume de madeira (m^3), disponível para abate e venda, se as árvores fossem abatidas na idade R anos.

P_R = Preço da madeira em pé ($\$/m^3$).

a = Custo anual de administração ($\$/ha$).

C = Custo de plantio + tratamentos culturais ($\$/ha$).

Convém observar que o valor de VET representa a soma das receitas líquidas descontadas para uma série de rotações, cada qual com R anos. Desta forma, para uma mesma rotação com R anos, e uma vez que o VET inclui o valor de uma série infinita de rotações subsequentes, o valor calculado para este critério será sempre superior em valor absoluto àquele determinado para o VPL (Valor Presente Líquido). VET e VPL serão iguais somente quando $VPL=0$.

4.6. A seleção de uma taxa de juros:

Conforme enfatizado por GREGORY⁷⁰ (p.271), uma decisão sobre a idade de rotação é fundamentalmente uma decisão inerente à teoria do capital. Neste sentido, a noção do valor do dinheiro, no tempo (i.e. a consideração dos "juros"), é uma condição básica em qualquer análise acêrca daquela decisão.

A escolha de uma adequada taxa de juros é fundamental para o exame assim como para a avaliação da atratividade financeira de qualquer decisão em análise de investimentos. Desta forma, também no caso da decisão sobre uma idade econômica de rotação, a aplicação de uma taxa de juros apropriada é um fator definitivamente crítico, independentemente do critério econômico de decisão que venha a ser adotado na análise.¹²

¹²Deve-se ressaltar que as alternativas de investimento consideradas neste estudo são os diferentes regimes de desbaste e idades alternativas para rotação, que possam ser aplicados a um povoamento florestal já estabelecido (ou a estabelecer, segundo uma determinada densidade inicial). Este projeto de pesquisa não contempla quer a decisão de investir ou não no estabelecimento de um povoamento florestal, quer o exame de outros projetos

Diversos autores (FORTSON & FIELD⁶⁶, OLIVEIRA¹⁰⁷, LEUSCHNER⁹⁵, FORTSON⁶⁶ e BUONGIORNO & GILLES²⁶) descrevem os diferentes fatores e condições que podem influenciar a escolha de uma taxa de juros. Basicamente, há que se distinguir investimentos do setor público ou do setor privado, o nível de risco envolvido, a liquidez e o prazo de investimento. Estes fatores são discutidos como segue.

Para uma empresa particular (leia-se, da iniciativa privada), a taxa de juros é determinada essencialmente pelo mercado para o capital. Se o dinheiro necessário para um projeto for obtido por meio de um empréstimo, a taxa de juros a ser utilizada para orientar a análise do investimento deverá ser pelo menos igual à taxa de juros compactuada entre as partes para a remuneração do capital emprestado. Conforme enfatizado por LEUSCHNER⁹⁵ (p.19) esta será a "taxa alternativa de retorno" ou o "custo de oportunidade" no qual se estaria incorrendo por não se obter uma remuneração para o capital investido que possa cobrir os juros que se deve pagar. Se, por outro lado, o dinheiro for proveniente de lucros já auferidos, então a taxa de juros deve ser definida pela melhor oportunidade de investimento disponível para a organização: i.e., a "taxa mínima de atratividade".

alternativos de investimento.

4.7. A obtenção de estimativas sobre a produção de madeira em diferentes idades:

A disponibilidade de estimativas sobre a produção corrente e futura de madeira, em diferentes idades, é imprescindível em qualquer análise comparativa de regimes silviculturais. Diversos procedimentos têm sido historicamente utilizados para a obtenção daqueles valores. Os métodos utilizados vão desde estimativas oculares descompromissadas, à existência de registros históricos, ou até mesmo à extrapolação de valores reais obtidos em situações supostamente similares. Na atualidade, entretanto, o uso de modelos matemáticos para crescimento e produção, é considerado uma das alternativas mais eficientes para a obtenção rápida das estimativas de produção necessárias em modelos de planejamento.

4.7.1. Modelos de crescimento e de produção (C&P):

O processo de modelagem do Crescimento e da Produção (C&P) é uma denominação coletiva para identificar o conjunto de procedimentos, métodos e técnicas utilizadas para descrever e quantificar a dinâmica do crescimento e da produção de árvores e de povoamentos florestais. Desta forma, denomina-se "Modelos de Crescimento e de Produção" às diferentes formas alternativas concebidas para se expressar as relações entre a) o crescimento e/ou a quantidade produzida de madeira, e b) os vários fatores ou características que podem explicar tanto o crescimento como a produção. Tais fatores ou características são essencialmente atributos quantificáveis (i.e., "variáveis") de uma árvore ou de um povoamento florestal, e que podem auxiliar na obtenção de

estimativas acêrca do seu crescimento e/ou da sua produção, corrente ou futura.¹³

A literatura em Mensuração Florestal (HUSCH et al.⁸¹, AVERY & BURKHART¹¹) indica que modelos de crescimento e de produção têm sido tradicionalmente apresentados na forma de tabelas, gráficos ou funções. Na atualidade, entretanto, estudos sobre a produção florestal utilizam com mais frequência as funções matemáticas. Isto deve-se principalmente ao progresso observado em Métodos Estatísticos, assim como devido à disponibilidade de computadores. Estes dois fatores têm permitido uma maior flexibilidade e velocidade tanto na construção de "modelos" como na sua utilização prática. CLUTTER et al.⁴⁰ e DAVIS & JOHNSON⁴⁶ descrevem a estrutura dos diversos tipos de modelos de C&P e analisam aspectos relevantes de cada qual. Não é propósito deste estudo examinar em detalhes como tais modelos podem ser desenvolvidos, mas tão somente enfatizar a sua utilidade.

¹³AVERY & BURKHART¹¹ indicam que "Crescimento" é sinônimo de incremento, refletindo a mudança, ocorrida em determinado período de tempo, nas dimensões observadas de uma árvore ou de um povoamento florestal. O conceito de Crescimento reflete um processo dinâmico. "Produção", por outro lado, é uma informação estática, indicando a quantidade de madeira disponível em determinado momento. O princípio de compatibilidade entre Crescimento e Produção (BUCKMAN²⁵, CLUTTER³⁹), estabelece que a acumulação, ou o somatório, do crescimento, permite que se obtenha a produção: i.e., a integração matemática de uma função de crescimento propicia, de maneira compatível, a correspondente função de produção.

4.7.2. SisPinus - Um sistema integrado para predição do crescimento e da produção:

Quando funções matemáticas são organizadas de forma interdependente objetivando obter estimativas numéricas para diferentes atributos componentes do processo de Crescimento e de Produção de uma árvore ou de um povoamento florestal, diz-se dispor de um "Sistema Integrado de Predição para Crescimento e/ou Produção". Estes sistemas integrados de equações matemáticas são também por vezes denominados "Simuladores de Crescimento e de Produção".

OLIVEIRA et al.¹⁰⁸ descrevem os procedimentos necessários para a utilização de um simulador de crescimento e de produção para plantações de *P. elliotii* e *P. taeda* estabelecidas nos Estados do Sul do Brasil. SisPinus, como é denominado aquele simulador, incorpora modelos de crescimento e de produção desenvolvidos com dados coletados em parcelas permanentes de amostragem e em experimentos de desbaste estabelecidos em florestas de empresas integrantes de uma cooperativa de pesquisa em manejo florestal na região sul dos EUA. Objetivando a sua adaptação às condições brasileiras, os modelos matemáticos originalmente desenvolvidos foram calibrados com dados coletados em parcelas permanentes estabelecidas em plantações florestais no sul do Brasil. HAFLEY et al.⁷² e SMITH & HAFLEY¹³⁶ descrevem particularidades do processo de desenvolvimento das equações básicas que compõem tal sistema integrado de predição, e avaliam o desempenho deste último como instrumento de trabalho (para as condições em que o sistema foi originalmente desenvolvido). Como

ênfâtizado por estes últimos autores, aquele modelo de prediçãõ utiliza como elemento básiço a distribuição bivariada de Johnson (SBB), e, desta forma, representa-se a distribuição da frequência do número de árvores por hectare, simultaneamente, por classes de DAP e por classes de altura total. Um total de nove funções básicas são necessárias para gerar as estimativas dos parâmetros daquela distribuição bivariada.

4.8. A seleção do melhor regime silvicultural:

4.8.1. Métodos alternativos para a análise:

A solução do problema de determinação simultânea do melhor regime de desbastes e idade de rotação tem recebido a atenção de diversos pesquisadores em produção florestal. O exame da literatura disponível indica que existem essencialmente três métodos alternativos para a apreciação técnico-científica deste complexo problema:

- a) enumeração total;
- b) análise marginal; e,
- c) técnicas de pesquisa operacional.

Na sequência, serão brevemente examinadas e discutidas algumas das características mais fundamentais de cada um daqueles procedimentos de análise e de otimização. Para cada qual, e, quando pertinente, comentários são apresentados acerca de algumas das contribuições mais relevantes observadas na literatura.

4.8.1.1. Enumeração total:

Obviamente, a forma mais simples e direta para identificar o regime silvicultural que propicia o mais elevado retorno financeiro é a determinação do valor absoluto do critério de análise para cada regime silvicultural incluído em um estudo. Por exemplo, determina-se o Valor Presente das Rendas Líquidas (VPL) para cada regime de interesse, selecionando-se aquele regime que propicia o mais elevado valor. Esta forma simplificada para tratamento do problema, entretanto, é a mais trabalhosa e elaborada, principalmente quando são consideradas as diferentes possibilidades para realização de cortes intermediários durante uma rotação. Quando, no entanto, os regimes silviculturais sob estudo incluem somente as operações de plantio e corte raso, a aplicação do método é relativamente simples. GREGORY⁷⁰ (p.279) e LEUSCHNER⁹⁵ (p.177) ilustram a utilização deste critério, assim como de outros métodos, para plantações de *P. radiata* D. Don e *P. palustris* Mill., respectivamente. Nestes dois estudos não foi considerada a realização de desbastes. CLUTTER et al.⁴⁰ (p. 220) apresenta o caso da aplicação do Valor Esperado da Terra (VET) para a seleção do melhor regime silvicultural, com enumeração total de valores, para plantações desbastadas de *P. elliotii*.

Este método tem sido também recentemente aplicado por diferentes pesquisadores no Brasil. Utilizando todos os procedimentos de análise reportados por BENTLEY & TEENGUARDEN¹⁸, BERGER¹⁷ descreve o uso do Valor Esperado da Terra (por inspeção total de todas as idades de rotação) para a determinação da

melhor idade de corte para povoamentos estabelecidos com *Eucalyptus saligna* Smith. Utilizando o mesmo procedimento, OHLSON & DUARTE¹⁰⁶ reportam um trabalho realizado para plantações de *Pinus* sp. estabelecidas em Arapoti, PR.

4.8.1.2. Análise marginal:

Segundo DUERR⁴⁹ (p.138), o raciocínio inerente aos procedimentos de análise Marginal implica na representação e redução de um problema complexo "(....) através de um conjunto de equações de receitas e de custos, mutuamente relacionadas, de tal modo que uma solução simultânea possa ser obtida" (i.e. uma solução para aquele sistema de equações simultâneas).

BRODIE et al.²¹ indicam que as primeiras tentativas de aplicação de Análise Marginal para solucionar o problema de decisão sobre Desbastes & Rotação, foram os estudos conduzidos pelo Serviço Florestal Norte Americano em 1963. Segundo Brodie e seus colaboradores, entretanto, naquela pesquisa fêz-se uso de um conjunto bastante restritivo de alternativas, fato que limita sobremaneira a aplicabilidade do método para outras situações. Um programa interativo de computador foi elaborado por CHAPPELE & NELSON³¹ também aplicando análise marginal a um exemplo prático para otimização simultânea de rotação e desbastes.

Apesar das tentativas de solucionar o problema através do uso de cálculo, WATT¹⁴⁸ aponta duas dificuldades que limitam sobremaneira o uso daquele método de solução para a otimização do desenvolvimento de sistemas biológicos (no tempo e no espaço). De

acordo com aquele autor, primeiro, quando existirem muitas possíveis condições para um sistema, certamente deverão acontecer um ótimo local e um ótimo nos limites do sistema. Assim, o processo de determinação da solução ótima global poderá eventualmente ser intratável em termos matemáticos. Uma segunda dificuldade é devida a natureza dos sistemas biológicos, cuja solução deve ser determinada sob um elevado número de restrições. Este último fato tornará o problema extremamente complexo, quando se faz uso de cálculo diferencial.

Um fenômeno natural e extremamente importante, mas com frequência ignorado na aplicação de Análise Marginal para a solução desta categoria de problema de otimização, é a mudança discreta em volume e/ou o valor associado com a transição entre duas classes de dimensões de árvores (por exemplo, a mudança de categoria de matéria-prima que ocorre de "toretas para celulose", para "toras utilizáveis no processamento mecânico em serraria"). Segundo MARTIN & EK⁸⁷, este fato frequentemente resulta em uma solução ótima local e em superfícies irregulares de resposta.

KILKKI & VAISANEN⁸⁷, entretanto, indicam a limitação possivelmente definitiva de Análise Marginal para a solução deste problema: apenas um "ótimo estático", baseado nas características de um povoamento, pode ser encontrado, mas não há como determinar sequência de decisões a ser utilizada para conduzir um sistema de uma situação qualquer para uma condição ótima.

4.8.1.3. Técnicas de "Pesquisa Operacional":

Em contraposição à solução analítica implícita à Análise Marginal (que faz uso intensivo de conceitos de cálculo integral e diferencial) algumas técnicas de Pesquisa Operacional propiciam uma solução numérica ao problema de otimização sob estudo.

NASLUND¹⁰⁰ examinou o problema segundo a perspectiva da teoria do "Controle Ótimo", mas não apresentou nenhuma solução que pudesse ser implementada. Comentando o estudo de Naslund, BRODIE et al.²¹ indicam que uma solução para a formulação proposta seria necessariamente contínua em termos de tempo e controle da densidade populacional. SCHREUDER^{128,129} comparou os procedimentos de análise envolvidos com a teoria do Controle Ótimo e de Programação Dinâmica, mas relata dificuldades técnicas que impossibilitaram a solução através do Controle Ótimo.

Dentre as técnicas de Pesquisa Operacional, Programação Dinâmica, em particular, tem sido utilizada de forma crescente para a solução deste problema durante estas duas últimas décadas. O estudo relatado por CHAPPELE & NELSON³¹ foi novamente examinado por AMIDON & AKIN⁵. Após solucionar o mesmo problema por meio do uso de Programação Dinâmica, estes últimos autores concluíram que esta técnica permite uma análise mais eficiente e flexível do problema do que o seu tratamento com Análise Marginal, propiciando, desta forma, possibilidades para o exame de um número maior de alternativas.

4.8.2. Características básicas de "Programação Dinâmica":

Programação dinâmica (PD) é um procedimento computacional numérico que permite a identificação do "melhor" sequenciamento de decisões, durante um determinado horizonte de planejamento, através da decomposição de um problema complexo e de grandes dimensões, em sub-problemas menores, interrelacionados e interdependentes, organizados em múltiplos estágios. Em contraste à Programação Linear, que utiliza um algoritmo de uso generalizado como o método "Simplex" para a solução de um problema de otimização, PD faz uso de um procedimento numérico de análise objetivando a identificação da estratégia ótima a ser utilizada, maximizando ou minimizando uma função-objetivo previamente elaborada. Frequentemente, aquele procedimento numérico é organizado na forma de um algoritmo, mas no entanto, específico para a natureza, estrutura e características peculiares de um determinado problema.

As características essenciais da estrutura básica e generalizada de problemas de Programação Dinâmica podem ser sumarizadas como segue:

- a) o problema é dividido em "estágios" sequenciais, sendo uma decisão necessária em cada qual. Ou seja, como afirma DYKSTRA⁶², "... a solução do problema requer uma sequência de decisões interrelacionadas.";
- b) em cada "estágio" existe um determinado número de "estados", ou, possíveis condições para o sistema objeto de um determinado estudo;
- c) o efeito de uma decisão tomada em qualquer estado é o de mover (ou transformar) o sistema segundo a sua descrição naquele estado para um outro estado, no estágio subsequente; e,

- d) a condição necessária que deve ser satisfeita por um problema de Programação Dinâmica está implícita ao "Princípio da Otimalidade" de BELLMAN¹⁴, conforme enunciado por BELLMAN & DREYFUS¹⁵: "Dado o estado atual do sistema, uma política ótima de decisões para todos os estágios remanescentes é independente de qualquer política de decisões adotada em estágios anteriores".^{14,15}

Segundo DYKSTRA⁵² (p.298), se um problema apresenta estas quatro características básicas, este poderá então ser formulado como um problema de Programação Dinâmica. WAGNER¹⁴⁷ (p.297) enfatiza, adicionalmente, que a apreciação de problemas de decisões sequenciadas, segundo a perspectiva de PD implica em se caracterizar um problema segundo a seguinte estrutura:

- a) as variáveis de decisão, juntamente com as suas respectivas restrições, são agrupadas em estágios, e tais estágios são considerados sequencialmente;
- b) as únicas informações sobre os estágios anteriores, e que são relevantes para selecionar valores ótimos para as variáveis de decisão no estágio corrente, são condensadas em uma variável chamada de estado, que pode ser n-dimensional (i.e. um "Vetor de Estado");
- c) a decisão corrente, dado o estágio presente do sistema, tem uma influência previsível sobre o estado no próximo estágio; e,
- d) a otimidade da decisão corrente é julgada em termos do seu impacto econômico previsto sobre o estágio atual e todos os estágios subsequentes.¹⁶

¹⁴Também denominado "Princípio de Otimidade" (WAGNER¹⁴⁷), ou "Princípio da Condição de Ótimo" (HILLIER & LIEBERMAN⁷⁵, p.269).

¹⁵ARIS⁹, pretendeu esclarecer [sic.] aquele enunciado, interpretando-o da seguinte forma: "Se você não fizer o melhor com o que está disponível, você jamais poderá fazer o que poderia ter sido feito com o que você deveria ter à sua disposição"!

¹⁶Obviamente, a natureza do "impacto" depende das características do problema: mesmo no caso de problemas de otimização de Desbastes & Idade de Rotação, o critério de avaliação das decisões pode ser outro, como, por exemplo, somente

4.8.3. Aplicações de Programação Dinâmica (PD) na solução de problemas inerentes à Engenharia Florestal:

Diversos autores examinaram as possibilidades de aplicação de Programação Dinâmica (PD) na solução de problemas de decisão no contexto da Engenharia Florestal. Muito embora AMIDON & AKIN⁶ sejam frequentemente citados como os precursores no uso desta técnica na solução de problemas florestais, esta revisão de literatura identificou os trabalhos de ARIMIZU^{7,8} como sendo os primeiros esforços de pesquisa que efetivamente reportam o uso do método. Em seus estudos pioneiros aquele pesquisador japonês verificou o grande potencial existente no uso de PD para a identificação do ótimo sequenciamento de decisões recursivamente dependentes.

Desde então, no contexto da Engenharia Florestal, PD tem sido utilizada para a solução de problemas de seccionamento (traçamento) do tronco de árvores (CLEMMONS³⁸; PNEVMATICOS & MANN¹¹⁵, FAALAND & BRIGGS⁵⁷, ENG et al.⁵⁵), administração do suprimento de madeira (BAILEY¹²), controle de pragas (WATT¹⁴⁸, NORTON & HOLLING¹⁰⁶), amostragem estratificada (GARAGORRY & VEIL⁶⁸), e, alocação ótima de unidades de amostra em estudos de Amostragem com Reposição Parcial de Parcelas - SPR (OMMULE & WILLIAMS¹⁰⁹).

No Brasil, até o momento da conclusão do presente estudo, o trabalho reportado por PAULA Jr. et al.¹¹⁴, foi identificado como possivelmente o único que utiliza PD na solução de um problema de

o volume da madeira (total ou comercial) removido em desbastes.

Engenharia Florestal. Aqueles autores aplicaram PD para solucionar um problema de alocação ótima de carvoarias (para a produção de carvão vegetal, utilizando madeira de *Eucalytus* sp.) em uma determinada região do estado de Minas Gerais.

O exame crítico da literatura internacional disponível, revela também a existência de alguns trabalhos em que se relata a utilização de Programação Dinâmica para a solução de problemas de otimização em silvicultura. No presente estudo, atenção especial é propiciada àqueles trabalhos que investigaram o problema de otimização simultânea das decisões de desbaste e da idade de rotação. Os trabalhos introdutórios ao tema documentados por RISVAND^{120,121}, ROSE¹²² e ROSE et al.¹²³, e, mais recentemente, por DYKSTRA⁵² e DAVIS & JOHNSON⁴⁶, contém elementos conceituais básicos acerca da aplicação de PD a esta classe de problemas. Os estudos conduzidos por BRODIE et al.²¹, KAO⁸⁴ e KENNEDY⁸⁶ reportam detalhes dos procedimentos de análise utilizados na atualidade. Alguns trabalhos, nesta área técnica, são merecedores de uma apreciação mais pormenorizada, como apresentado na sequência.

Em seu estudo pioneiro, ARIMIZU⁷ aplicou PD para a regulação de cortes intermediários em povoamentos florestais, objetivando maximizar o volume total explorado durante toda uma rotação fixa. HOLL⁷⁹ relatou a concepção de uma estratégia para decisões de simplesmente "cortar ou não cortar" durante o processo de controle da produção florestal. Posteriormente HOOL⁸⁰ apreciou o mesmo problema acrescentando também uma cadeia de Markov. Segundo

CHEN et al.^{32,33}, entretanto, este segundo enfoque ao problema tem uma aplicação muito limitada, devido às probabilidades de transição com valor constante. Estes últimos autores relataram um estudo inovador que considera intensidades de desbaste que podem assumir valores em um espaço contínuo. Saliente-se que até então, todos os trabalhos assumiram valores discretos para as possibilidades de desbaste. Apesar deste aprimoramento, este enfoque não encontrou muita aceitação entre os pesquisadores que têm se dedicado ao tema. Aparentemente, a necessidade de se proceder à diferenciação, para se obter o valor ótimo da variável de decisão em cada estágio, é um fator restritivo para o uso generalizado do método.

Outros estudos que acrescentaram valiosas informações aos procedimentos de aplicação de PD em Silvicultura devem ser também mencionados. A utilização de um Simulador de Crescimento e de Produção, na forma de Modelos de Distribuição Diamétrica e Modelos para Árvores Individuais, tem sido reconhecida como uma das questões mais importantes a ser superada para facilitar o efetivo uso de PD na solução do problema de otimização de desbastes e corte raso: quando um Simulador de C&P é incorporado diretamente na Função-Objetivo de um problema, pode-se descrever a condição do povoamento florestal com bastante detalhamento. Este artifício causa, entretanto, um substancial aumento do número de variáveis de estado, o que por sua vez tem efeito direto nas necessidades computacionais do procedimento de otimização. ADAMS & EK³ e BRODIE & HAIGHT²³ discutem as

condicionantes que devem ser consideradas no desenvolvimento de estudos que contemplem a utilização de um Simulador de C&P como parte integrante da formulação matemática do problema.

Quanto às implicações resultantes do aumento no número de variáveis de estado, o exame de alguns poucos trabalhos revelou o vertiginoso incremento na complexidade que existe em se implementar a formulação matemática, assim como o aumento exponencial das necessidades computacionais. A este respeito é oportuno mencionar a evolução do grau de dificuldade constatada nos seguintes estudos: TAIT¹³⁹ utilizou uma única variável de estado para um problema de determinação do ótimo regime de talhadia simples para plantações de *Eucalyptus* sp. (o mesmo problema havia sido solucionado anteriormente por MEDENA & LYON⁹⁸ aplicando cálculo diferencial); uma pesquisa conduzida por BRODIE & KAO²² fez uso de um modelo com três variáveis de estado (idade, área basal e N/ha) de tal modo que a análise das decisões de desbaste pudesse incorporar a aceleração no crescimento em diâmetro dos troncos das árvores; RIITERS, et al.¹¹⁹ e HANN et al.⁷⁴ examinaram o problema de produção ótima, e simultânea, de madeira e pastagem, em plantações de *P. ponderosa* Laws, utilizando uma formulação complexa e bastante elaborada do problema (na literatura da área, o estudo reportado por estes últimos autores é reconhecido como aquele que incorpora o maior número de "variáveis de estado": idade, área basal, N/ha e tempo decorrido desde o último desbaste).

Considerada uma extensão natural dos conceitos envolvidos

com Programação Dinâmica com simples objetivo, conforme sugerem DAELLENBACH & KLUYVER⁴¹, a inclusão de objetivos múltiplos na análise foi reportada por KLUYVER et al.⁸⁹. Detalhes dos procedimentos analíticos que devem ser utilizados para a solução de problemas via PD, quando se considera mais que um objetivo na análise, podem ser também examinados em TAUXE et al.¹⁴⁰. Estes últimos autores, no entanto, reportam a aplicação da técnica no manejo de recursos hídricos. KLUYVER et al.⁸⁹ consideram que cada decisão de desbaste deve avaliar a maximização da produção financeira resultante da exploração simultânea de madeira para celulose, serraria e laminação. Entende-se, no entanto, que muito embora a solução numérica do problema com mais que um objetivo seja uma possibilidade efetiva, como descrevem aqueles autores, a definição do regime silvicultural ótimo em termos financeiros, é condição suficiente para a apreciação do problema com um único objetivo. Este último é o enfoque utilizado na solução numérica desenvolvida para o problema objeto do presente estudo.

4.8.4. Limitações na utilização de Programação Dinâmica:

Apesar da existência de contribuições relatando o uso de Programação Dinâmica na Ciência Florestal, como anteriormente descrito, CHEN et al.³² afirmam que a limitada utilização desta técnica em questões florestais jamais poderia ser debitada à ausência de problemas. Segundo aqueles autores, o uso restrito desta técnica no âmbito florestal pode ser explicado pelo fato de que a grande maioria dos trabalhos que a incorporam na análise

não apresentam uma derivação explícita dos procedimentos computacionais utilizados. Uma vez que os algoritmos são específicos para cada problema, e que o nível da matemática utilizada não é trivial, a ausência de detalhes analíticos restringe dramaticamente as possibilidades de entendimento dos textos descritivos. Uma limitação adicional de muitos estudos é a ausência de modelos de crescimento e de produção apropriados e diretamente relacionados com as variáveis de decisão.

A estes dois fatores deve-se acrescentar ainda a constatação de que muitos leitores, embora sejam profissionais florestais qualificados, não estão familiarizados quer com a técnica quer com as condições mínimas e específicas que devem ser atendidas para que um problema possa ser tratado como um problema de Programação Dinâmica.

Possivelmente, estas limitações não são específicas da Engenharia Florestal. Outras áreas potenciais para a aplicação de PD poderão apresentar restrições da mesma natureza. Certamente, entretanto, estes são obstáculos adicionais ao fato de que a magnitude dos problemas a solucionar por meio de PD pode ser bastante reduzida uma vez que existe o efeito da "explosão de dimensionalidade", conforme alertado por BELLMAN & DREYFUS¹⁶ em seus estudos pioneiros no desenvolvimento da teoria de PD.

5. MATERIAL E MÉTODOS.

5.1. A base de dados para o estudo:

O estudo foi proposto e desenvolvido para atender a uma das questões mais frequentemente observadas no gerenciamento de plantios de *P. taeda* estabelecidos no sul do Brasil. Obviamente, para que fosse possível a sua utilização em toda a região Sul do Brasil, um modelo analítico deveria ser desenvolvido a partir de uma ampla base de dados. Em função das evidentes dificuldades que existem em se dispor de tais informações, optou-se por se trabalhar ao nível de um "Estudo de Caso". Com este propósito, portanto, esta investigação científica fez uso de dados obtidos em plantações de *Pinus taeda* L. estabelecidas em propriedades florestais da empresa "Papel de Imprensa S.A.", PISA, e localizadas no município de Jaguariaíva, PR.

A localização geográfica da área em que os dados básicos para o estudo foram coletados é apresentada na Figura 3. Segundo a descrição contida no Zoneamento Ecológico para Plantios Florestais no Estado do Paraná, elaborado e publicado pelo Centro Nacional de Pesquisa de Florestas (EMPRESA⁵⁴) a área de interesse para este projeto de pesquisa é caracterizada como uma região de transição entre as regiões 1 e 4 (regiões Centro-Sul e Planalto Norte do Estado), conforme a classificação adotada naquele estudo.

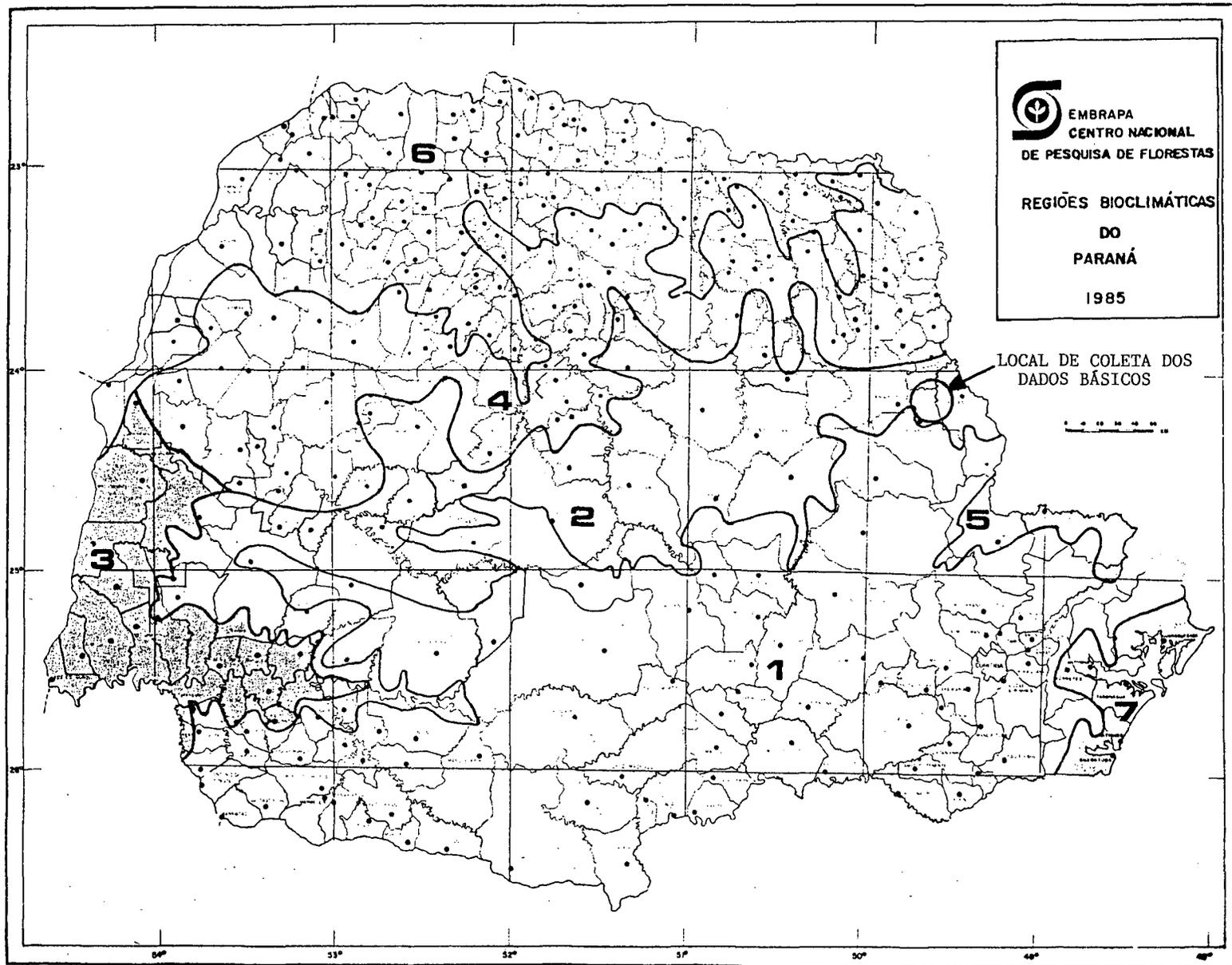


FIGURA 3. Regiões Bioclimáticas do Estado do Paraná e localização da área de coleta dos dados básicos para este estudo.
 Fonte: EMBRAPA-CNPFlorestas (EMPRESA⁵⁴)

De acordo com aquele documento, a região de Jaguariaíva, PR, é caracterizada por altitudes entre 550 e 900 m, Floresta Ombrófila Mista (i.e., com ocorrência de *Araucaria angustifolia* Bert. O.Ktze.) e clima submontano úmido (tipo temperado quente). A temperatura média anual situa-se entre 17,5 e 21 graus C, com até 28 geadas por ano. A precipitação média anual varia de 1.200 a 2.000 mm, e sua distribuição é intermediária ou periódica. O deficit hídrico é nulo.

5.2. Formulação do problema em silvicultura:

5.2.1. Regimes silviculturais contemplados no estudo:

Alguns regimes silviculturais alternativos foram considerados para inclusão neste estudo. Tais regimes, apresentados na Figura 4, foram assim identificados porque representam uma amplitude bastante razoável das práticas silviculturais em uso corrente no Sul do Brasil.

Neste estudo assume-se que um total de 2000 mudas sejam estabelecidas por hectare (o que é equivalente a um espaçamento inicial de 2,00 x 2,50m entre as mudas). Muito embora existam evidências de que diversas empresas florestais estariam propensas a considerar densidades iniciais menos conservadoras (AHRENS⁴), aquela densidade é utilizada no presente estudo por estar representando o espaçamento mais frequentemente praticado na silvicultura de espécies coníferas no Brasil. É oportuno ressaltar também que, no Brasil, por ocasião do primeiro

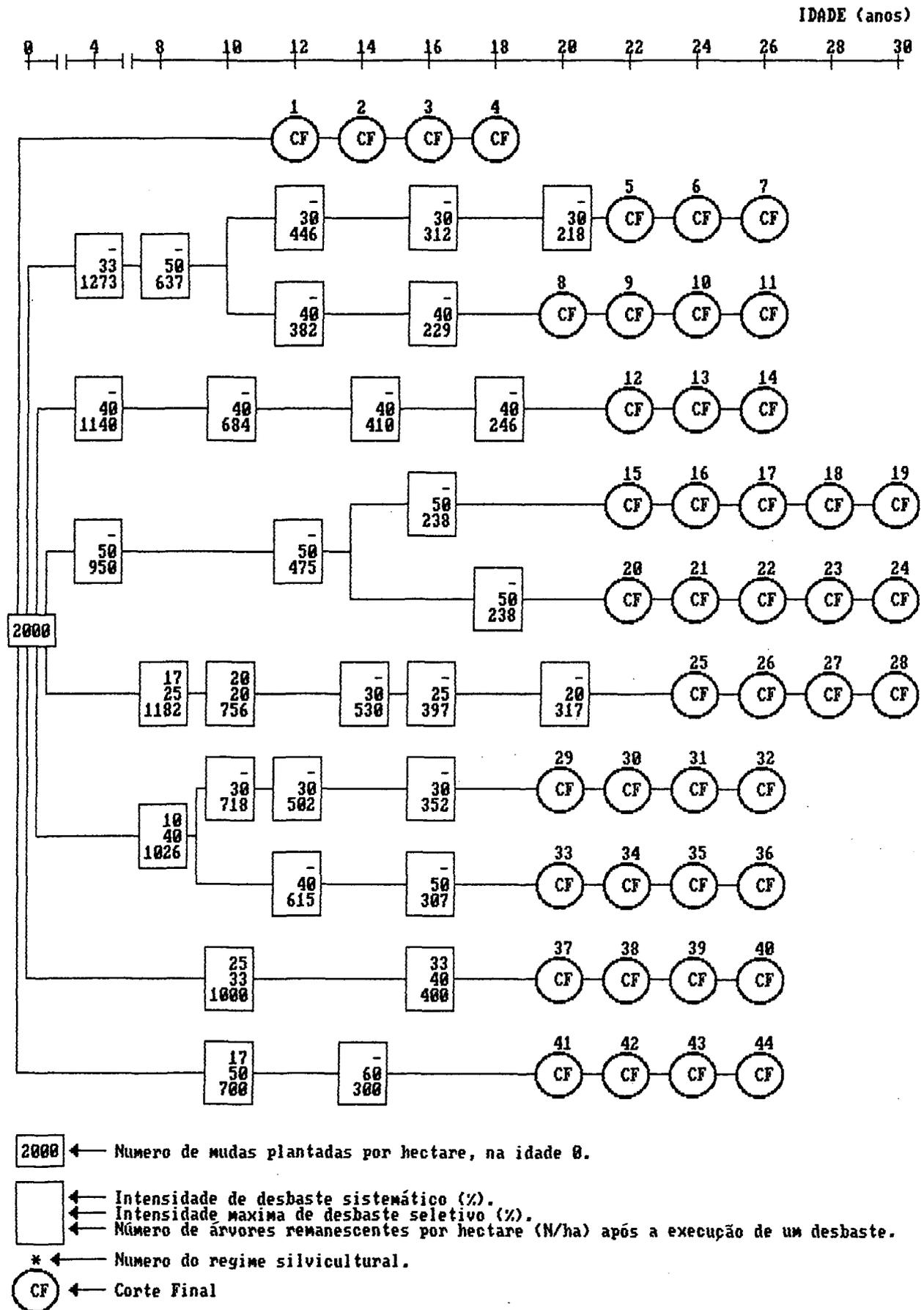


FIGURA 4. REGIMES SILVICULTURAIS CONSIDERADOS NESTE ESTUDO.

desbaste, faz-se uso integrado e complementar dos métodos de desbaste "Sistemático" e "Seletivo Baixo". Na execução dos demais desbastes adota-se o método "Seletivo Baixo".

A Figura 4 ilustra a posição cronológica das decisões de corte (desbastes e corte raso) dos diferentes regimes silviculturais incluídos no estudo. Na concepção inicial desta pesquisa, entendeu-se que esta investigação deveria contemplar as mais diversas possibilidades de produção de madeira, ou seja: dado um conjunto de condições básicas (custos de produção, volume de madeira por sortimento e para cada decisão de desbaste ou de corte raso, preços para a madeira por classe de produto, e uma taxa especificada de juros), o modelo de otimização deve permitir a seleção do regime silvicultural que propicia o máximo retorno financeiro ao proprietário. A este "Regime Silvicultural Ótimo" estará associado o máximo Valor Presente das Rendas Líquidas sobre uma série contínua e sucessiva de rotações, i.e. o máximo Valor Esperado da Terra (VET).

Em função das razões anteriormente expostas, procurou-se incluir no estudo alguns regimes silviculturais julgados apropriados para a produção de madeira com diferentes características, conforme diferentes forem as necessidades qualitativas da matéria-prima requerida. Desta forma, as seguintes possibilidades para a produção de madeira foram contempladas:

- a) madeira de pequenas dimensões (i.e. toras curtas e de pequeno diâmetro) para a produção de biomassa (utilizadas essencialmente para o processamento de fibras e de partículas, na produção de celulose, papel e chapas de fibras ou de partículas de madeira);
- b) toras de grandes dimensões para processamento em serrarias e laminadoras; e,
- c) tanto madeira de pequenas dimensões como toras de grandes diâmetros.

Na Figura 4, os regimes de números 1 a 4 são obviamente apropriados quando existe o interesse em se produzir preferencialmente (ou, por vezes, exclusivamente) madeira na forma de biomassa. Estes regimes envolvem somente o plantio de mudas e o corte raso do povoamento que venha a ser formado em idades alternativas para rotação entre 12 e 18 anos. No Sul do Brasil, as únicas empresas que têm considerado esta possibilidade para a prática da silvicultura são a Papel e Celulose Catarinense, PCC, e a RIGESA, localizadas, respectivamente, em Correia Pinto, SC, e Três Barras, SC.

Os regimes de número 5 a 24 foram incluídos na análise de modo a contemplar as situações em que se objective privilegiar a produção de toras de grandes dimensões para processamento mecânico (i.e. para utilização em serrarias e laminadoras). Estes regimes implicam na adoção de rotações mais longas, assim como na realização de um desbaste pré-comercial, em idade precoce (i.e., 4 anos): naquela oportunidade, deve-se abater aquelas árvores que certamente seriam dominadas em consequência à competição pelos fatores do crescimento, e que, portanto, seriam eliminadas através da mortalidade resultante à concorrência. Adicionalmente,

em um desbaste pré-comercial abatem-se também árvores cujos troncos tenham características indesejáveis como tortuosidade excessiva, bifurcações e copa quebrada, dentre outras imperfeições com frequência observadas.¹⁷

Os regimes silviculturais que têm sido tradicionalmente praticados em plantações de *Pinus* sp. estabelecidas no Sul do Brasil, entretanto, são regimes para a produção de madeira para os mais diferentes usos, durante uma mesma rotação. Assim, conforme observado por AHRENS⁴, por se praticar silvicultura desta forma tradicional e conservadora, procura-se dar uma utilização a toda a madeira que possa ser produzida, uma atitude que pode ser questionada sob determinadas circunstâncias. No sul do Brasil existem diversas empresas verticalizadas e que utilizam toda a madeira produzida, quaisquer que sejam as dimensões das toras. Muito embora o processamento desta madeira seja uma realidade, i.e. de toras com os mais variados diâmetros e comprimentos, a produção desta matéria-prima em regimes silviculturais globais (i.e. para usos múltiplos) pode não ser econômica. A noção de que o uso múltiplo da madeira é um compromisso profissional, tem conduzido proprietários florestais a efetivamente produzir toda a madeira que eventualmente possa

¹⁷Este desbaste pré-comercial deve ser preferencialmente seletivo. Se porventura este fosse sistemático, obviamente seria mais racional estabelecer a plantação original com um espaçamento mais amplo, i.e. com uma menor densidade de mudas por hectare. Apesar deste fato, sempre poderá existir a eventual situação em que a redução da densidade de um povoamento florestal, em condições pré-comerciais, deverá ser realizada de forma sistemática.

ser produzida, a qualquer custo. Ou seja, por vezes, entende-se que o uso múltiplo da madeira implica, necessariamente, em uso múltiplo da terra. Nestas circunstâncias, um conceito que deveria ser tratado como uma possibilidade, é, com frequência, indevidamente interpretado como se fosse uma obrigação ética inquestionável.

Os regimes documentados na literatura revelam algumas similaridades entre as práticas de desbaste adotadas na Klabin Agro-Florestal S.A. (PUCCI¹¹⁸) e para a Cia. Agrícola e Florestal Monte Alegre -CAFMA (NICOLIELLO^{103,104}, SCOLFORO¹³⁰). Nestas duas empresas, o primeiro desbaste é composto por um componente sistemático (abate e remoção de uma linha de árvores em cada seis, ou seja, $1/6 = 17\%$) seguido de um complemento seletivo de modo a deixar aproximadamente 1000 árvores por hectare. Na Klabin o segundo desbaste é parcialmente realizado de forma sistemática ($1/5 = 20\%$) acrescido de uma remoção seletiva de árvores de modo a atingir a intensidade desejada, enquanto que na CAFMA todos os desbastes após o primeiro são seletivos, removendo-se as árvores de menor dimensões e de pior forma. Estas duas empresas praticam regimes silviculturais com 5 desbastes. Na CAFMA a intensidade de seleção é maior, talvez porque esta empresa considera também o objetivo de produzir toras para laminação. Neste estudo, os regimes praticados por estas duas empresas foram reunidos em um único grupo (Regimes 25 a 28).

As diferentes formas para realização de desbastes, conforme praticadas por outras grandes empresas florestais estabelecidas

no Sul do Brasil, estão representadas pelas estratégias contidas do regime 29 ao regime 40. As idades alternativas para rotação, entre 20 e 26 anos, foram estabelecidas para representar a variação verificada na prática corrente.

Os regimes de número 41 a 44 traduzem uma tentativa de se representar, para *P. taeda*, as práticas de desbaste utilizadas para plantações de *P. radiata* D. Dom. estabelecidas na Nova Zelândia. A Papel de Imprensa S.A., PISA, tem procurado implementar um regime que se assemelha ao regime 43.

5.2.2. Obtenção e tratamento dos dados básicos:

5.2.2.1. Estimativas da produção de madeira:

Objetivando superar uma das limitações indicadas por CHEN et al.³³, este estudo teve também o propósito de incorporar (de maneira explícita) um modelo de crescimento e de produção na forma de um simulador. Desta forma foi possível prognosticar o volume de madeira disponível após a aplicação de alternativas para desbaste e corte raso.

O simulador de C&P adaptado por OLIVEIRA et. al.¹⁰⁸, para plantações de *Pinus elliottii* e *P. taeda* localizadas no Sul do Brasil, foi utilizado como um instrumento para a geração das estimativas de volume de madeira em diferentes idades. Como enfatizado anteriormente, tais estimativas de produção são necessárias para cada um dos diversos regimes silviculturais considerados neste estudo.

Para que seja possível o seu uso no desenvolvimento de um modelo de otimização para silvicultura, como proposto neste estudo, um Modelo de Crescimento e de Produção deve possuir alguns atributos específicos e fundamentais. Primeiro, deve permitir a obtenção de estimativas de produção de madeira em consequência à realização de um ou mais desbastes. Da mesma forma, esta informação deve ser produzida para populações não desbastadas.

Segundo, as projeções de crescimento devem estar condicionadas à densidade remanescente de um povoamento florestal após a realização de qualquer desbaste. Desta forma, estarão representadas as "Substituições Equivalentes e Intertemporais" (Trade-offs) que ocorrem entre as receitas obtidas com a realização de desbastes e aquelas advindas do corte final.

Em terceiro lugar, a mudança nas dimensões das árvores (particularmente no Diâmetro à Altura do Peito - DAP), devem ser quantificáveis, de forma tal que se possa representar as reações de crescimento consequentes à realização de um desbaste.

Finalmente, as estimativas de produção (i.e. o volume de madeira) devem estar disponíveis por classe de DAP, e, preferencialmente, por sortimento (ou categoria de produto).

SisPinus, em sua versão modificada, dispõe de uma estrutura que satisfaz alguns destes requisitos básicos. Disponível para uso em microcomputadores compatíveis com equipamentos IBM-PC, SisPinus foi inicialmente acessado nas instalações do Centro Nacional de Pesquisa de Florestas - CNPFlorestas, da Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Posteriormente, após os estudos conduzidos pela empresa "Cálculoexato Pesquisa Operacional S/C Ltda.", fêz-se uso de uma versão aprimorada de SisPinus. As alterações introduzidas no sistema original, por esta última empresa, permitiram que fosse estimado o volume de madeira por classe de produto e por árvore, dispondo-se tão somente do volume total de madeira do seu tronco. O somatório destes volumes de madeira (i.e. por classe de sortimentos e por árvore) propicia a informação equivalente por unidade de área. Desta forma, portanto, foram obtidas as estimativas de produção futura de madeira por hectare, por sortimentos, e segundo as diferentes idades, intensidades e métodos de desbaste, de acordo com a prescrição de cada regime silvicultural, conforme apresentado no Anexo 1.

Obviamente, o mesmo cenário de simulação foi utilizado para todos os 44 regimes silviculturais: a) uma densidade inicial de 2000 mudas plantadas por hectare; e, b) uma produtividade potencial "média" (ou seja, adotou-se a classe de sítio 18,5, com idade-índice de 15 anos). O modelo que representa a relação "Altura Dominante vs. Idade" foi aquele anteriormente desenvolvido pela PISA, para utilização exclusiva em suas propriedades florestais.

5.2.2.2. Dimensões e preços para madeira em pé:

O valor para os diâmetros máximos e mínimos, com casca, assim como para o comprimento das toras, por sortimentos,

conforme caracterizado anteriormente, são apresentados na Tabela 1. Por razões de conveniência, e objetivando simplificar a descrição do trabalho desenvolvido, aqueles sortimentos são identificadas simplesmente como "Celulose", "Serraria" e "Laminação".

Os preços para madeira em pé, por sortimentos, são também tabulados abaixo. Estes últimos valores foram estimados após a apreciação dos valores computados pela PISA Florestal, assim como depois de considerar as informações prestadas pela empresa FIBRA Florestal Ltda. Esta última é uma empresa tradicional e com sólida experiência em exploração de áreas reflorestadas com espécies de Pinus no Paraná. Aquelas estimativas de preços são, portanto, valores médios para a região objeto deste estudo.

TABELA 1. DIMENSÕES E PREÇOS DAS TORAS, POR SORTIMENTOS.

Sortimentos	Diâmetro cc (cm)		Comprimento (m)	Preço* (US\$/m ³ cc)
	Mínimo	Máximo		
Celulose	7,00	18,00	1,00 e 1,20	2,50
Serraria	>18,00	<25,00	3,00 e 2,40	6,00
Laminação	>25,00		2,40	12,00

* valores para madeira em pé: US\$1,00 = Cr\$265,35 (09/05/91)

Os preços para "madeira em pé", por sortimentos, foram utilizados para converter as informações de volume de madeira (Anexo 1.) em valores monetários (Anexo 2.) indicando a receita líquida que pode ser obtida, por hectare, pela execução de cada operação de desbaste ou de corte raso, segundo a prescrição de idade, método e intensidade anteriormente especificadas.

5.2.2.3. Custos:

Os dados fornecidos pela PISA incluíram também informações sobre custos de algumas atividades fundamentais frequentemente executadas na prática da silvicultura com espécies de *Pinus*, conforme apresentado na Tabela 2.

O custo de "Plantio" incorpora os custos de todas as atividades de preparo do solo, o custo das mudas assim como aquele do seu plantio propriamente dito. Sob "manutenção" deve-se entender as operações de roçada e/ou de capina, atividades normalmente efetuadas durante o primeiro e segundo anos após o plantio das mudas desta espécie. Os valores apresentados para os custos da execução de desbastes pré-comerciais são estimativas rudimentares e aproximadas.¹⁸ Adicionalmente, uma vez que os preços para madeira, conforme apresentados anteriormente (Tabela 1.), fornecem esta informação para "madeira em pé", na Tabela 2 não foram apresentados valores para os custos de execução quer dos desbastes comerciais quer do corte raso. O "Custo de Administração" corresponde a um "Centro de Custo" no qual estão incorporados os custos referentes a salários, encargos sociais, aluguéis e energia elétrica, dentre outros custos frequentemente agregados sob aquela denominação.

¹⁸Não existem registros acêrca da realização de desbastes pré-comerciais a nível operacional, em plantações de *Pinus sp.*, no Brasil. Desta forma, neste estudo, não houve como recuperar valores para os custos associados a esta operação. As estimativas apresentadas refletem uma síntese das discussões mantidas sobre o assunto com diferentes profissionais.

TABELA 2. VALORES PARA OS CUSTOS OPERACIONAIS (US\$/ha).

Idade (anos)	Atividade	Custo (US\$/ha)
0	Plantio	250,00
1	Manutenção	35,00
2	Manutenção	35,00
anual	Administração	20,00
4	Desbaste pré-comercial (33%)	40,00
4	Desbaste pré-comercial (40%)	50,00
4	Desbaste pré-comercial (50%)	60,00

US\$1,00 = Cr\$265,35 (09/05/91)

5.3. Formulação do problema em Programação Dinâmica:

Programação Dinâmica é uma técnica de programação matemática muito eficiente para a solução de problemas cuja função objetivo possa ser decomposta em componentes organizados em estágios.

O uso de Programação Dinâmica na solução do problema de determinação do "ótimo" regime de desbastes e rotação tem sido proposto na literatura durante esta última década por diversos autores. Após os estudos pioneiros de ARIMIZU^{7,8}, SCHREUDER¹²⁹ e de RISVAND^{120,121}, alguns pesquisadores exploraram as possibilidades de utilização de PD para o controle da densidade de povoamentos florestais, ao longo do tempo (i.e. ao longo de uma rotação), de modo a se otimizar a produção volumétrica total de madeira por unidade de área.

Os elementos mais importantes da estrutura do modelo de otimização desenvolvido neste estudo são descritos na Figura 5. No centro de tal estrutura encontra-se o algoritmo de otimização cuja concepção, elaboração e detalhamento são reportados neste documento.

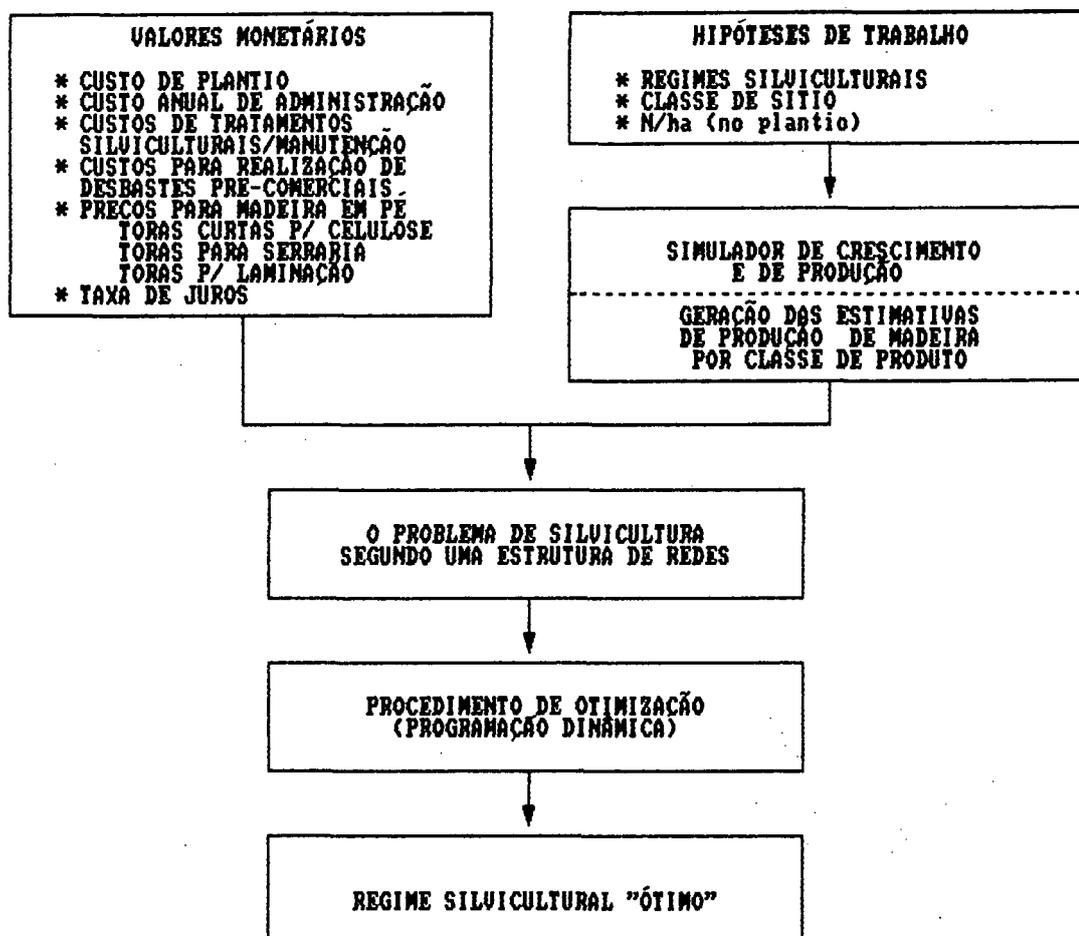


FIGURA 5. COMPONENTES FUNDAMENTAIS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO DESENVOLVIDO NESTE ESTUDO.

5.3.1. O problema como uma rede acíclica:

Uma representação analógica do problema objeto deste estudo, segundo a perspectiva da modelagem, é apresentada na Figura 6. Os regimes silviculturais alternativos incluídos no estudo podem ser organizados segundo uma estrutura de rede acíclica, contendo arcos e nós de decisão, entre um nó-origem (a terra limpa, antes do plantio das mudas) e um nó-destino (a terra limpa, após o corte raso do povoamento florestal).

Observando a terminologia de Programação Dinâmica, o momento quando uma decisão de desbaste pode ser tomada, é denominado "estágio". A condição do sistema (i.e., o povoamento florestal), em qualquer estágio, é identificada por um "estado" ou "nó". Uma decisão de desbaste é representada por um arco conectando dois estados, em estágios subsequentes. A consequência de uma decisão é a de mover ou transformar o sistema de uma determinada condição (i.e. um nó, ou um determinado estado, em um determinado estágio), para outra condição (um outro nó, ou um outro estado, no estágio subsequente). Mesmo que uma possível decisão seja não desbastar, nem realizar o corte raso, o sistema será naturalmente modificado, uma vez que, de qualquer maneira, as árvores deverão crescer, levando o povoamento a uma outra condição ao longo do tempo.

Qualquer trajetória através da rede, i.e. uma sequência de arcos e nós de decisão, que possa ser individualizada entre o nó-origem e o nó-destino, está representando um determinado regime silvicultural. O propósito do modelo de otimização desenvolvido neste trabalho de pesquisa, e que faz uso de Programação Dinâmica como método de solução, foi o de identificar o melhor regime silvicultural, para o critério de decisão considerado.

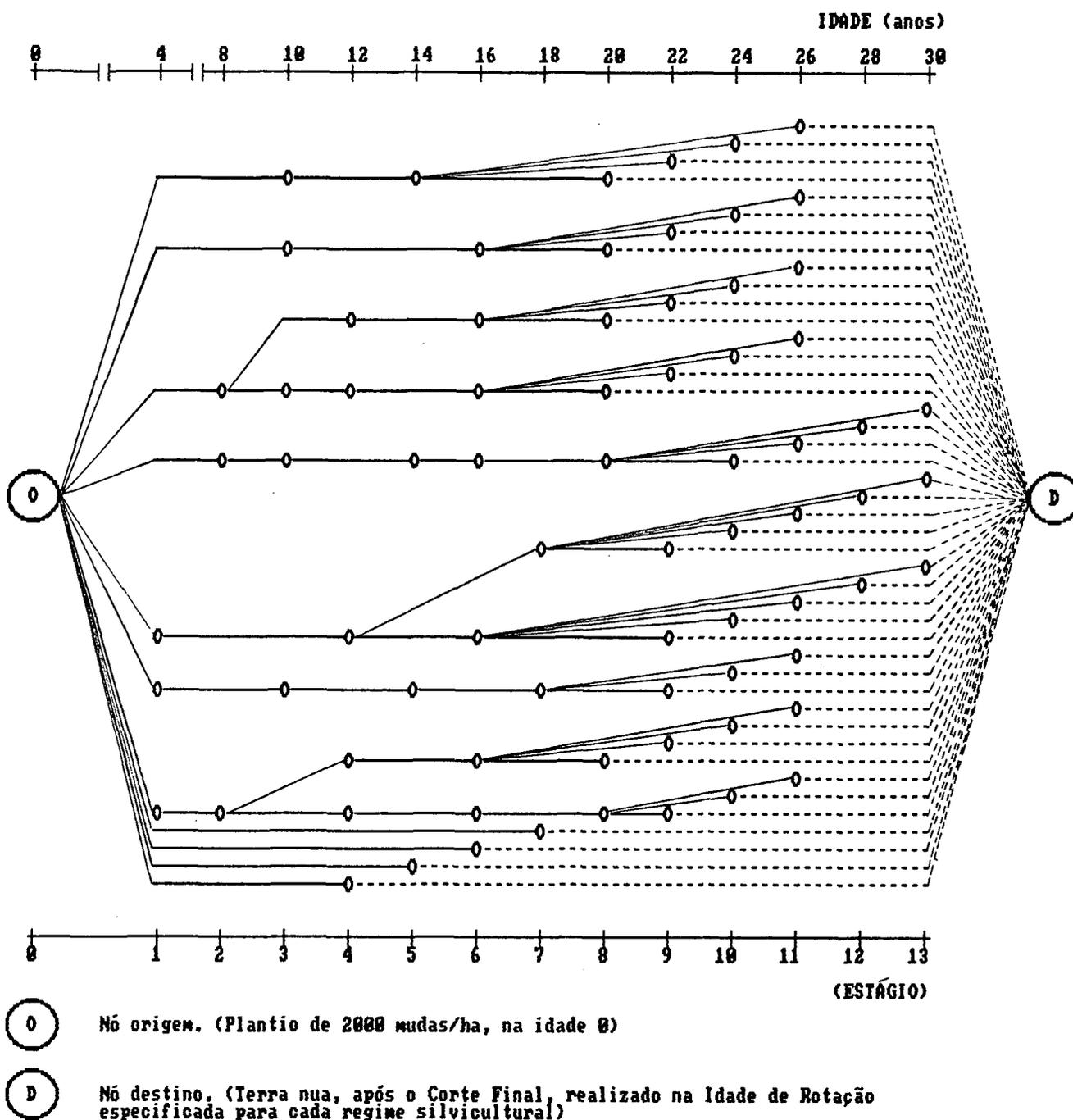


FIGURA 6. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROBLEMA DE SILVICULTURA SEGUNDO UM MODELO DE REDES.

5.3.2. Os procedimentos "Forward" e "Backward":

Diversos problemas em Programação Dinâmica podem ser estruturados segundo o que a literatura convencionou chamar de formulações "forward" (para frente) e "backward" (para trás). Nestes casos, para um mesmo problema, soluções idênticas (i.e., uma política ótima de decisões) podem ser determinadas por qualquer um daqueles dois procedimentos. Existem problemas, no entanto, que apresentam uma estrutura tal que somente um daqueles dois métodos pode ser utilizado: por vezes, o método forward é o mais adequado, e, em outras situações, a solução do problema requer a aplicação do método "backward".

De um maneira genérica, o problema de otimização simultânea das decisões de desbaste e de corte raso pertence à primeira categoria de problemas, conforme acima descrito. Existem, no entanto, algumas diferenças importantes na aplicação daqueles dois métodos no que diz respeito às características específicas de um problema. De forma análoga, os benefícios que se pode obter em cada caso são igualmente diferentes.

As vantagens e desvantagens da utilização dos métodos "forward" e "backward", para a solução desta classe de problemas de decisão, são examinadas e descritas por BRODIE et al.²¹ como segue:

Método de formulação para frente (forward):

- a) A solução ótima é encontrada em uma única passagem pela rede (tanto para os problemas de rotação única, como para as situações em que se consideram séries infinitas de rotações);
- b) Soluções parciais são trajetórias ótimas para rotações mais curtas. Adicionalmente, valores para VET podem também ser obtidos para rotações mais curtas e/ou mais longas do que aquela associada ao máximo VET; e,
- c) Soluções parciais não contém o ótimo regime de desbastes para o restante da rotação, quando os níveis de densidade [estados] que não pertencem à trajetória ótima forem considerados.

Método de formulação para trás (backward):

- a) As soluções parciais contém as trajetórias ótimas para o restante da rotação. Desta forma, a solução final propicia o ótimo regime de desbastes e a ótima rotação para níveis de densidade [estados] não incluídos da trajetória ótima;
- b) O processo requer uma análise individual para cada rotação alternativa, qualquer que seja o critério de decisão utilizado, VET ou VPL; e,
- c) Não há como realizar uma análise de sensibilidade da solução ótima (fazendo variar a idade de corte final ou rotação ótima), a não ser que o procedimento de otimização seja novamente aplicado, individualmente, para cada rotação de interesse.

Após aquela análise comparativa, BRODIE et al.²¹ concluíram que a formulação "forward" é mais adequada para a solução deste tipo de problema, uma vez que "(....) a formulação 'forward' é mais flexível para a análise de desbastes". MARTIN & EK⁹⁷ documentaram uma opinião semelhante, indicando que: "Esta parece ser a formulação mais lógica para problemas em silvicultura (....) visto que modelos de crescimento e de produção são normalmente definidos na forma de diferenças 'para frente'.

Ademais, o estágio final não será conhecido até que o retorno cumulativo ótimo tenha sido identificado".

No desenvolvimento do presente estudo, entretanto, verificou-se que não se poderia generalizar a argumentação apresentada por aqueles autores. Desta forma, neste estudo, e apesar das supostas vantagens comparativas do método "forward", procedeu-se ao uso da formulação "backward", e com efetivo sucesso.

5.3.3. Os elementos básicos da formulação matemática:

Na solução de problemas de Programação Dinâmica, alguns conceitos fundamentais devem ser adequadamente estabelecidos antes que uma formulação matemática possa ser elaborada. Com este propósito, e após considerar tanto a natureza como as características do problema objeto deste estudo, os seguintes elementos foram definidos:

Estado: É uma variável " x_k " que descreve uma determinada condição do sistema (i.e. o povoamento florestal), em um dado momento " k " (ou estágio), ao longo do horizonte de planejamento. Ou seja, " x_k " representa o volume total de madeira presente no povoamento florestal, em um determinado momento, antes que uma decisão de desbaste ou de corte raso possa ser tomada.

Estágio: Uma variável que indica os instantes de tempo em que se pode realizar uma intervenção no estado do sistema. Ou seja, "um estágio" identifica a oportunidade para realizar um corte de árvores, quer seja através de um desbaste, quer seja por meio do corte final. Neste estudo, os estágios são descritos por valores discretizados " k "=0,...,n, e que representam os momentos em que aquelas intervenções podem ser realizadas no povoamento florestal, desde o plantio, à idade 0, até o corte final, efetivado em uma idade de rotação " R "=12,...,30 anos.

Decisão: Variável " u_k " que caracteriza uma alteração provocada no estado do sistema. Ou seja, uma decisão pode identificar tanto a realização de um desbaste (segundo especificações pré-estabelecidas), como a execução do corte raso. Em ambos os casos, " u_k " representa um determinado volume de madeira removido do povoamento florestal.

Equação de Transição de Estado: É uma igualdade matemática que estabelece a natureza da relação entre um estado " x_k ", e a decisão " u_k ", em um determinado estágio " k ", com o estado " x_{k+1} ", no estágio subsequente.

Função Critério: É a expressão matemática " $r_k(x_k, u_k)$ ", que fornece os retornos monetários associados à tomada das decisões " u_k " em cada estado " x_k ". Neste "Estudo de Caso" os valores definidos pela função critério são apresentados no Anexo 3.

Equação de Recursividade: É uma expressão matemática que representa a forma funcional com que os estados, os estágios, as decisões e os retornos monetários estão relacionados de maneira recursiva e sequencial. A estrutura da Equação de Recursividade, concebida para este problema de decisões sequenciadas, será descrita após uma caracterização generalizada do problema de otimização.

Condições de Contorno: Conhecimento da condição do sistema no estágio inicial ($k=0$) e no estágio final ($k=n$). Dentro deste conceito são também impostas limitações acêrca dos estados assim como acêrca das decisões. Ou seja, deve-se definir os "domínios" dos estados e das decisões.

5.3.4. Expressão generalizada do problema de otimização:

O problema de otimização objeto deste estudo pode ser representado por meio de estruturas simbólicas alternativas e fazendo uso de diferentes notações. Dentre as diversas possibilidades disponíveis decidiu-se adotar alguns elementos da descrição documentada por PAREDES-VELOSO & BRODIE¹¹³. Incorporando-se alguns conceitos sugeridos por aqueles autores descreve-se abaixo a forma geral com que este problema de otimização pode ser estruturado e representado matematicamente:

$$\max_{u_k} f_n(y_n) = \sum_{k=1}^n r_k(x_k, u_k) \quad (\text{eq. 5.1})$$

s.a.

$$x_k - u_k + G_{k+1}(y_k) = x_{(k+1)} \quad (k = 1, \dots, n-1) \quad (\text{eq. 5.2})$$

$$x_k - u_k = y_k \quad (k = 1, \dots, n) \quad (\text{eq. 5.3})$$

$$x_n - u_n = 0 \quad (\text{eq. 5.4})$$

$$u_k \in U_k, \quad x_k \in X_k$$

onde:

$f_n(y_n)$: valor ótimo da função objetivo. Ou seja, o máximo valor acumulado dos retornos monetários que se pode obter por se tomar as decisões de desbaste em uma sequência de "n" estágios ou etapas de decisão, produzindo um povoamento florestal descrito por " y_n ". Neste estudo, " y_n " corresponde à condição do sistema após o corte final, no último estágio, "k".

$r_k(x_k, u_k)$: representa o retorno monetário associado à tomada da decisão " u_k " quando o sistema for descrito por " x_k ". Ou seja, " r_k " propicia a receita auferida pela realização de um desbaste ou do corte raso, ou, alternativamente, o custo de plantio assim como aquele incorrido ao se realizar um desbaste pré-comercial.

y_k : variável que descreve o povoamento florestal, no estágio "k", após a decisão " u_k " ter sido tomada naquele estágio e quando o sistema é descrito por " x_k ". " y_k " é por vezes denominado variável ou vetor de estado residual.

x_k : variável que descreve a condição do povoamento florestal no estágio "k", antes que uma decisão " u_k " possa ser tomada, produzindo o seu crescimento até uma condição " x_{k+1} ", no estágio posterior "k+1". Frequentemente, " x_k " é também chamado variável ou vetor de estado inicial.

X_k : conjunto de valores admissíveis para a variável de estado " x_k ", no estágio "k".

U_k : vetor de todas as possíveis decisões de desbaste " u_k ", e que irão transformar o povoamento da condição " x_k " para a condição " y_k ", produzindo, de forma simultânea, o retorno monetário " $r_k(x_k, u_k)$ ". Com frequência, " U_k " é também denominado "Vetor das Variáveis de Decisão".

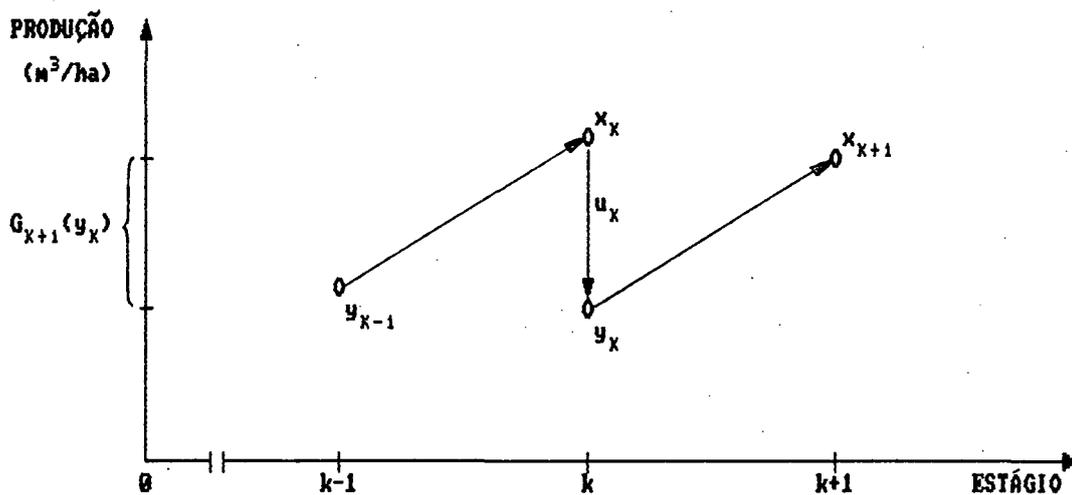
Em problemas de otimização, a equação 5.1 é conhecida como "Função Objetivo", e indica que o valor da solução ótima global é uma função dos valores parciais obtidos entre os estágios 1 e n.

A equação 5.2 é reconhecida como a "Equação de Transição de Estado" uma vez que estabelece a relação entre: a) a variável de estado " $x(k)$ ", e a variável de decisão " $u(k)$ ", ambas no estágio " k ", e, b) a variável de estado " $x(k+1)$ ", no estágio " $k+1$ ".

A equação 5.2 pode ainda ser facilmente identificada como a "Equação de Transformação" típica na aplicação de Programação Dinâmica na solução de "Problemas de Estoque": a condição do sistema no estado " $x(k+1)$ ", no estágio " $k+1$ ", é determinada pela condição do sistema no estado " $x(k)$ ", no estágio anterior " k ", subtraindo o valor da demanda decorrente da decisão tomada naquele estágio, e acrescida do valor da produção " G ", que tenha ocorrido após a descrição no sistema depois que aquela decisão de demanda tenha sido tomada.

A equação 5.3 estabelece que uma mudança de estado do sistema, em um mesmo estágio, depende da decisão que possa ser tomada. Em problemas de otimização das decisões de desbaste e corte raso, esta restrição é representada por um Simulador de Crescimento e de Produção, uma vez que deve-se dispor de uma descrição do povoamento florestal antes e após a execução de cada desbaste. Um protótipo que representa a maneira como estes

conceitos são relacionados é apresentado na Figura 7. De forma análoga, e a título de ilustração, a Figura 8. contém uma concepção espacial de uma situação hipotética em que quatro decisões alternativas de desbaste podem ser tomadas em um determinado momento.

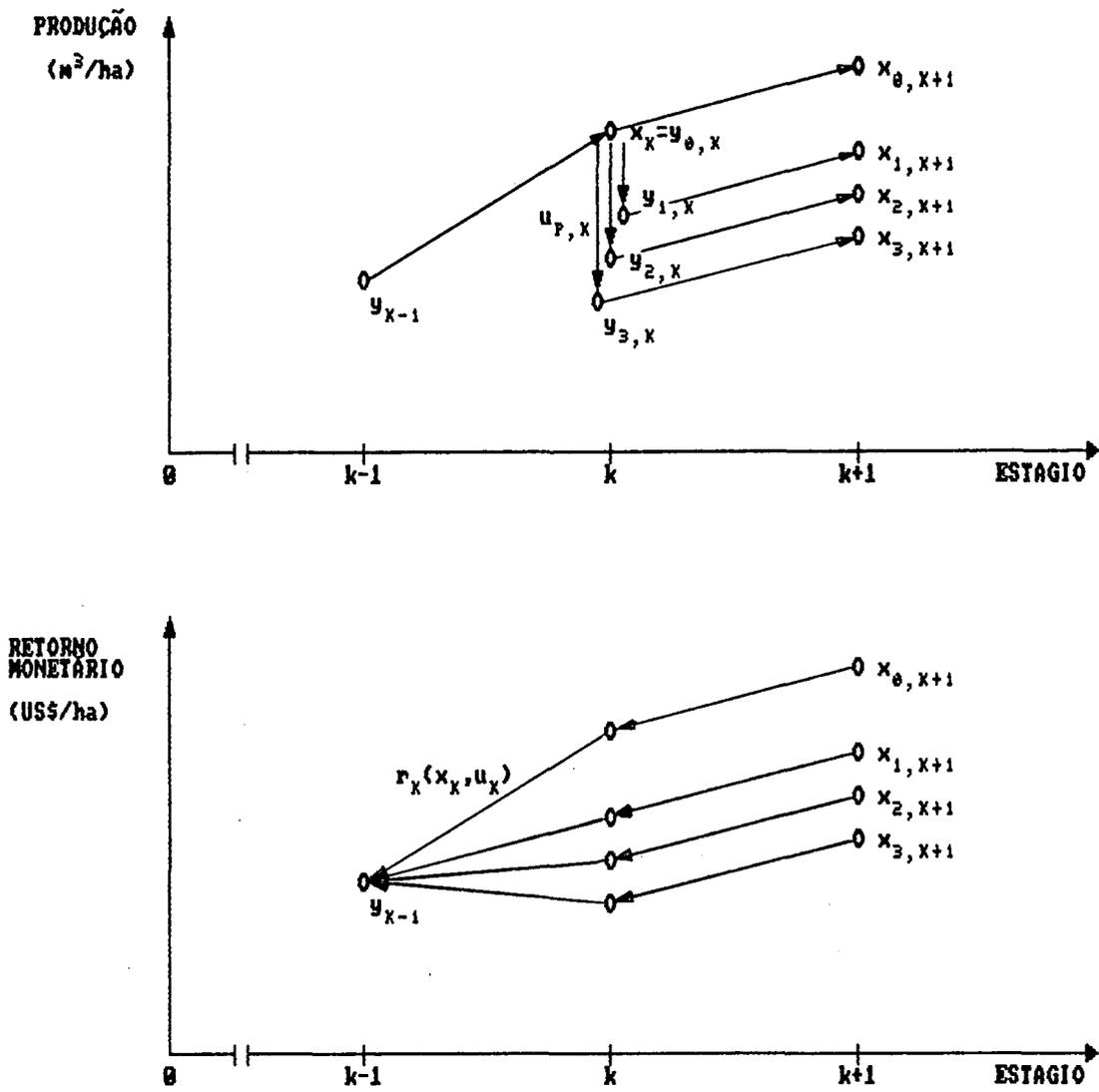


u_x indica uma decisão de desbaste, e que propicia um retorno monetário " $r_x(x_x, u_x)$ ".

$G_{k+1}(y_x)$ indica o crescimento ocorrido entre os estágios " k " e " $k+1$ ", após ter sido realizado um desbaste, no estágio " k ", e que conduziu o sistema da condição " x_x " para a condição " y_x ".

FIGURA 7. A PERSPECTIVA CRONOLÓGICA DE UMA DECISÃO DE DESBASTE.

A equação 5.4 é uma descrição do estado do sistema após o estágio " n ", ou seja, depois que o corte-raso tenha sido realizado. No entender de PAREDES-VELOSO & BRODIE¹¹², sempre que a formulação "forward" seja utilizada, o valor de " n " é desconhecido durante a análise, até que este estado final seja



$u_{p,x}$ indica uma decisão de desbaste, e que propicia um retorno monetário $r_x(x_x, u_x)$

FIGURA 8. A PERSPECTIVA CRONOLÓGICA DE QUATRO DECISÕES DE DESBASTE.

alcançado. Segundo aqueles autores, "n", na formulação "forward", é uma variável de decisão. No presente estudo, entretanto, fez-se uso de uma formulação "backward", e, desta forma, o valor de "n" foi previamente estabelecido. Nestas circunstâncias, portanto, existe uma relação direta entre "n" e a maior idade de rotação considerada na análise.

Um problema de otimização, organizado em múltiplos estágios, pode ser considerado plenamente descrito quando se dispõe das equações acima especificadas, das condições iniciais e finais do sistema, assim como dos limites de factibilidade para as variáveis de estado e de decisão.

5.3.5. Estrutura da Equação de Recursividade:

Objetivando solucionar o problema de otimização simultânea da idade de rotação e regime de desbastes, foi necessária concepção de uma "Equação de Recorrência", ou "Equação de Recursividade". A literatura nesta área técnica (NEMHAUSER¹⁰¹, JACOBS⁸², WAGNER¹⁴⁷, HILLER & LIEBERMAN⁷⁵) refere-se a este procedimento como um "Algoritmo Recursivo", e a fórmula correspondente é conhecida como uma "Recursão".

A equação de recursividade inicialmente concebida para este estudo, e conforme as características específicas do problema em questão, é apresentada e descrita como segue (a simbologia é aquela tradicionalmente utilizada na formulação matemática e no exame de problemas em Programação Dinâmica):

$$f_k(y_k) = \underset{\{y_{k+1}, u_k\}}{\text{ótimo}} \{r_k(x_k, u_k) + [f_{k+1}(y_{k+1})]\} \quad (\text{eq. 5.5})$$

(onde os símbolos têm o mesmo significado que nas equações 5.1 a 5.4).

Uma vez que este estudo trata de um problema de Maximização do benefício financeiro durante um determinado horizonte de planejamento, a equação 5.5 toma a seguinte forma ou estrutura:

$$f_k(y_k) = \underset{\{y_{k+1}, u_k\}}{\text{max}} \{r_k(x_k, u_k) + [f_{k+1}(y_{k+1})]\} \quad (\text{eq. 5.6})$$

Nas duas equações acima apresentadas a expressão $\{y_{k+1}, u_k\}$ indica que o processo de maximização ocorre após o exame de todos os estados " y_{k+1} ", no estágio anterior " $k+1$ ", que podem ser alcançados a partir do estado presente " x_k ", após tomar as decisões " u_k ".

A equação 5.6, estruturada segundo o método de formulação "para trás" (backward), descreve a seguinte relação recursiva:

"O valor corrente de uma política ótima, em qualquer estágio presente de decisão " k ", (onde $k=1, \dots, n$), é obtido pela determinação do valor máximo (i.e. ótimo) resultante da soma de dois valores:

- a) o valor do retorno " r_k " consequente ao ato de se tomar a decisão " u_k ", no estado " x_k ", no estágio presente " k "; e,
- b) o valor acumulado da política ótima de decisões tomadas até o estágio " $k+1$ ", anteriormente examinado.

Outra maneira para se expressar a equação 5.6, em palavras, é a seguinte. O valor de uma política ótima, isto é, de uma sequência ou estratégia de decisões, pode ser examinado como sendo a soma de dois componentes: o primeiro componente indica o retorno monetário decorrente de uma decisão imediata; o segundo componente representa o somatório dos retornos obtidos pela sequência de decisões a serem tomadas e que, por sua vez, formam uma política ótima parcial desde o momento presente até o momento do corte final, na idade de rotação.

5.3.6. A conversão dos dados de produção física em valores monetários:

Uma vez que o problema sob estudo implica em se examinar regimes silviculturais que incorporam diferentes idades para o corte final, não se pode, sob estas condições, simplesmente determinar o Valor Presente Líquido associado a cada arco. Em análise financeira, isto seria equivalente a se comparar projetos alternativos com diferentes horizontes de planejamento. Nestas circunstâncias, i.e. diferentes rotações, será necessário determinar o valor monetário da receita (ou do custo) equivalente ao "Valor Esperado da Terra" para cada arco. O valor assim obtido será uma função da idade de rotação associada a cada regime, considerando-se, desta forma, uma série contínua e sucessiva não somente de rotações de mesmo comprimento, mas de regimes silviculturais idênticos.

Desta forma, objetivando determinar a política ou estratégia de decisões que propicia o máximo Valor Esperado da Terra (VET), foi necessário converter o valor numérico implícito ao retorno monetário associado a cada arco (conforme apresentado na Fig.6), utilizando-se aquele critério de análise financeira. Neste estudo, esta conversão foi efetivada aplicando-se o procedimento de cálculo recomendado por DAVIS & JOHNSON⁴⁶ (p.514), como segue:

O valor monetário corrente associado a cada arco foi capitalizado para o final da respectiva rotação, e, na sequência, descapitalizado para o momento zero, ou início do horizonte de planejamento, segundo uma série uniforme e infinita de pagamentos. Desta maneira, procurou-se refletir o recebimento (ou pagamento) de um determinado valor, em uma mesma idade, perpetuamente, rotação após rotação. Ou seja, segundo este procedimento, deve-se multiplicar o valor do retorno monetário originalmente

associado a cada arco, pelo seguinte fator de desconto FD_1 :

$$FD_1 = \{(1+i)^{R-t} / [(1+i)^R - 1]\} \quad (\text{eq. 5.7})$$

onde:

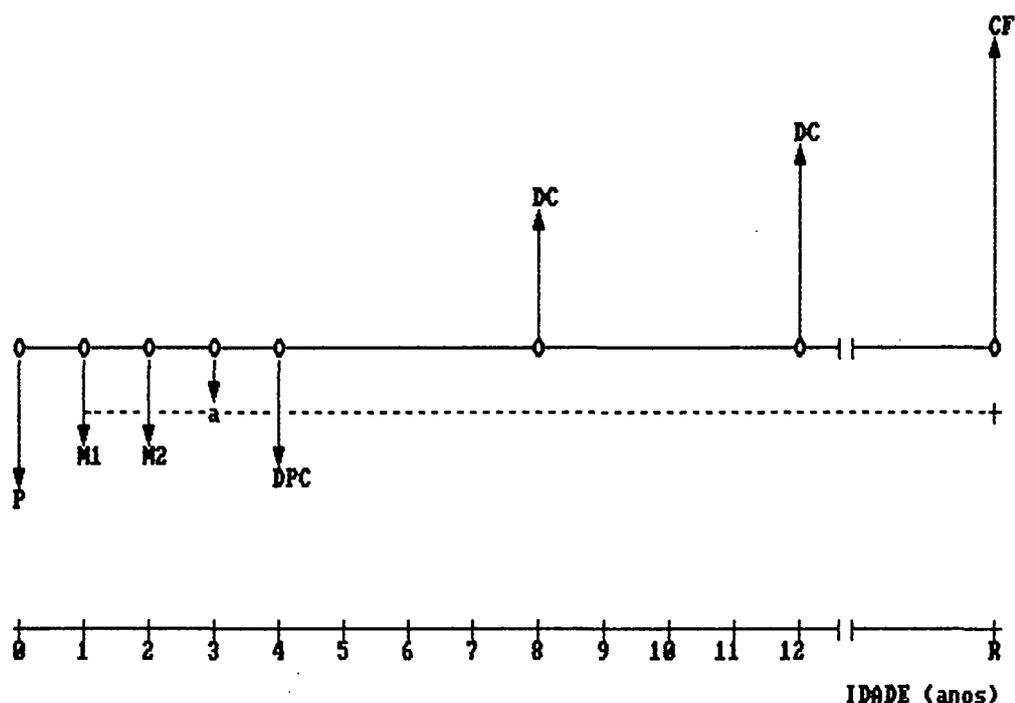
i = taxa de juros ($i=0,06$)

R = Rotação (em anos)

t = idade (em anos) em que uma decisão de desbaste deve ou pode ser tomada

Segundo este procedimento, o valor monetário associado a cada arco de decisão, propicia, após a sua conversão, um valor equivalente ao VET, para aquela decisão em particular. Este último, será portanto, função direta do momento de sua ocorrência em relação a uma rotação específica, dentre as diversas rotações consideradas na análise. Somente após esta conversão dos dados, o problema poderá ser solucionado através de Programação Dinâmica.

Com este propósito, foram utilizadas as informações disponíveis sobre a receita líquida total por hectare advinda da execução dos desbastes e do corte raso em cada regime silvicultural (Anexo 2.). As informações acerca dos custos de plantio, de manutenção, de administração anual e de execução do desbaste pré-comercial são aquelas apresentadas na Tabela 2. A disposição cronológica daqueles eventos, durante uma rotação com "R" anos, na forma de um "Fluxo de Caixa", é ilustrada com a Figura 9.



onde:

- P = Custo de Plantio.
- M1 = Custo de Manutenção durante o primeiro ano após o plantio.
- M2 = Custo de Manutenção durante o segundo ano após o plantio.
- a = Custo anual de administração.
- DPC = Custo de Realização de um Desbaste Pré-Comercial.
- DC = Receita Líquida de um Desbaste Comercial.
- CF = Receita Líquida após a execução do Corte Final (ou Corte Raso).
- R = Idade de Rotação.

FIGURA 9. FLUXO DE CAIXA TÍPICO PARA DECISÕES EM SILVICULTURA.

Para a execução dos cálculos necessários à determinação do Valor Esperado da Terra, VET, correspondente a cada evento dos fluxos de caixa de cada regime silvicultural, fez-se uso das fórmulas abaixo relacionadas. Os valores resultantes da aplicação destas fórmulas são apresentados no Anexo 3.

a) Custos de plantio, de Manutenção nos anos 1 e 2, e de Administração Anual:

Conforme a recomendação documentada por DAVIS & JOHNSON⁴⁶ (p.516), o custo de plantio (P), custo anual de administração (A)

e os custos de manutenção (M1 e M2), incorridos nos dois primeiros anos de cada rotação, foram condensados em uma única variável PAM1M2, após ter sido calculado o Valor Presente de cada qual. Esta última, por sua vez, é que foi utilizada para o cálculo do Valor Esperado da Terra correspondente (PAM1M2VET). Este procedimento foi utilizado uma vez que aqueles eventos são realizados para todos os regimes silviculturais, mas, no entanto, com idades de rotação distintas.

$$\begin{aligned} \text{PAM1M2} = \{ & P + [A*((1+i)^R - 1)/(i*(1+i)^R)] + \\ & + [M1*(1/(1+i)^1] + [M2*(1/(1+i)^2)] \} \end{aligned} \quad (\text{eq. 5.8})$$

$$\text{PAM1M2VET} = \text{PAM1M2} * \text{FD1} \quad (\text{eq. 5.9})$$

b) Custo de realização de desbaste pré-comercial:

Para aqueles regimes silviculturais que contemplam a realização de um desbaste pré-comercial, o correspondente Valor Esperado da Terra, para o custo de realização daquela operação, foi obtido pelo produto do respectivo custo (DPC) pelo fator de desconto associado.

$$\text{DPCVET} = \text{DPC} * \text{FD1} \quad (\text{eq. 5.10})$$

c) Receita líquida decorrente da realização de um desbaste comercial:

A receita líquida decorrente da realização de cada desbaste comercial (DC), e para cada regime, foi convertida para o equivalente Valor Esperado da Terra.

$$\text{DCVET} = \text{DC} * \text{FD1} \quad (\text{eq. 5.11})$$

d) Receita Líquida referente ao corte final:

Da mesma forma como realizado com os desbastes comerciais, a receita líquida que poderia ser obtida com a realização de cada operação de corte final (CF) foi multiplicada pelo respectivo fator de desconto, resultando o equivalente Valor Esperado da Terra, como segue:

$$CFVET = CF * FD1 \quad (\text{eq. 5.12})$$

onde:

PAM1M2 = Variável resultante da agregação do Valor Presente (na idade 0) dos custos de plantio (P), custo anual de Administração (A) e dos custos de manutenção (M1 e M2) nos dois primeiros anos de cada regime silvicultural.

PAM1M2VET = Valor Esperado da Terra correspondente à variável PAM1M2, para cada regime silvicultural, com uma rotação de "R"anos.

DPCVET = Valor Esperado da Terra correspondente ao custo de realização de um determinado desbaste pré-comercial (DPC).

DCVET = Valor Esperado da Terra correspondente à receita líquida de um determinado desbaste comercial (DC).

CFVET = Valor Esperado da Terra correspondente à receita líquida de um corte final (CF)

FD1 = Fator de Desconto determinado pela equação 5.7.

5.4. A solução do problema através de Enumeração Total:

Por "Enumeração Total", ou "Inspeção Total", deve-se entender o procedimento de análise pelo qual determina-se o valor associado a cada uma de todas possíveis políticas de decisão incluídas em um determinado estudo. Na sequência, aqueles valores devem ser examinados comparativamente, escolhendo-se, ao final da

análise, aquela política que propicia o maior valor, para o critério de avaliação utilizado.

Obviamente, existem diversas possibilidades para se executar este procedimento de busca exaustiva. ARDUINO⁶ (p.56-7) descreve um dos possíveis métodos de busca. Na determinação da política ótima de decisões por Inspeção Total, neste estudo, e fazendo uso do método sugerido por aquele autor, seria necessário escrever um programa de computador que executasse os seguintes passos:

- a) determinação do VET para o primeiro regime, e armazenamento daquela informação em uma memória;
- b) determinação do VET para o segundo regime, e armazenamento da informação em outra memória;
- c) comparação dos dois valores anteriormente calculados para VET, e escolha do melhor.
- d) determinação do VET para o terceiro regime, repetindo-se o passo anterior de comparação (descrito em c); e,
- e) repetir o procedimento até a completa exaustão de todas as possibilidades, quando então o regime silvicultural com o máximo VET teria sido determinado.

Neste estudo, entretanto, fez-se uso do pacote LOTUS-1-2-3, uma planilha eletrônica comercial, e cuja utilização permitiu que os resultados fossem obtidos de forma rápida, sem que houvesse a necessidade de elaborar um programa de computador específico. Os arquivos de dados foram manipulados de maneira a criar uma matriz com todos os regimes silviculturais ordenados de forma decrescente segundo o valor numérico associado ao Valor Esperado da Terra para cada qual.

Conforme ressaltado por CLUTTER et al.⁴⁰ (p.218) é sempre oportuno enfatizar que a fórmula básica para cálculo do Valor

Esperado da Terra pode ser escrita de diferentes maneiras, sendo todas equivalentes em termos algébricos. Neste estudo a fórmula utilizada para a determinação destes valores tem a seguinte estrutura:

$$VET_R = \sum_{t=0}^R [(RB_t - C_t) * (1+i)^{R-t}] / [(1+i)^R - 1] \quad (\text{eq. 5.14})$$

onde:

VET_R = Valor Esperado da Terra, para um regime silvicultural com rotação igual a "R" anos.
 RB_t = Receita Bruta na idade t (t=0,...,R).
 C_t = Custos incorridos na idade t.
 i = taxa de juros (0,06)

5.5. A solução do problema através de Programação Dinâmica:

5.5.1. O procedimento de otimização:

O objetivo de qualquer problema de Programação Dinâmica é o de maximizar (ou, alternativamente, minimizar) o valor acumulado de todos os retornos ou consequências das decisões tomadas em cada estágio, durante um horizonte de planejamento. Como enfatizado anteriormente, aquele procedimento de otimização é executado através da avaliação de uma "Equação de Recursividade", obedecendo a um dos dois procedimentos alternativos, "forward" ou "backward". Neste estudo, adotou-se o procedimento "backward" conforme descrito na sequência.

A análise foi iniciada pela identificação da solução parcial ótima dentre todas as possíveis alternativas ou decisões admissíveis no último estágio. Na sequência, o processo teve

continuidade, para trás (i.e., em direção ao início da rede, ou nó-origem), examinando-se cada estágio, sequencialmente, e aplicando-se a equação de recursividade para a avaliação das decisões admissíveis em cada qual.

Aplicando-se a sequência de operações acima descrita no presente estudo, o procedimento computacional iniciou-se no último estágio ($k=n$), determinando-se o valor do retorno associado a cada uma das decisões de corte final. Para facilitar o entendimento, pode-se supor a existência de um nó ou estado artificial, terminal, único e comum para todos os 44 regimes silviculturais. Este último estado estará representando a terra limpa, após o corte final do povoamento. Na sequência, examinou-se a rede de estados, estágio após estágio, para trás, determinando-se o retorno associado com a política parcial ótima se a decisão fosse seguir de um determinado estado intermediário até o estado final. O procedimento foi aplicado até atingir o estágio inicial ($k=0$), encontrando-se então a solução ótima global.

Durante a análise, ao se avaliar cada estado intermediário, a seguinte pergunta hipotética foi formulada: "uma vez que é necessário determinar a política de decisões que propicia o máximo retorno acumulado, entre a condição presente do sistema e a sua condição final, ao término do horizonte de planejamento, qual é o melhor estado, no estágio anterior (i.e. de frente para trás)?" A resposta para esta pergunta implica em se armazenar somente a informação que indique qual a melhor política parcial

ótima daquele estado até o estado terminal, eliminando-se todas as demais políticas parciais (dominadas). Segundo DAELLENBACH et al.⁴² é precisamente esta característica de Programação Dinâmica a causa para a drástica redução no número de avaliações necessárias.

A Figura 10 representa a estrutura do problema considerando a existência de 13 estágios. Em cada estágio, os estados admissíveis são representados por um dos seguintes três tipos de "nós": a) nós artificiais, com retorno associado nulo, e sem qualquer efeito na evolução do sistema; b) nós reais que indicam a realização de um desbaste, com retorno monetário, mantendo-se o sistema em um mesmo regime; e, c) nós reais que indicam a realização de um desbaste, com retorno monetário, e que conduzem o sistema para um outro regime silvicultural.

No exame daquela rede, verificou-se, entretanto, que após o estágio 9 não existe mais a possibilidade de mudar de regime silvicultural (uma mudança de regime é causada quando determinadas decisões de desbaste são tomadas). Ou seja, após aquele estágio, pode-se tomar somente decisões de corte final.

Desta forma, por conveniência, e para tornar o problema mais compacto, a estrutura definitiva adotada neste estudo é apresentada na Figura 11, onde o problema matemático reduz-se à uma rede com somente 9 estágios (i.e., um "Modelo Analógico" que representa o problema de Silvicultura / Manejo Florestal originalmente descrito). Esta redução nas dimensões do modelo, no entanto, não implicou em qualquer modificação nas características

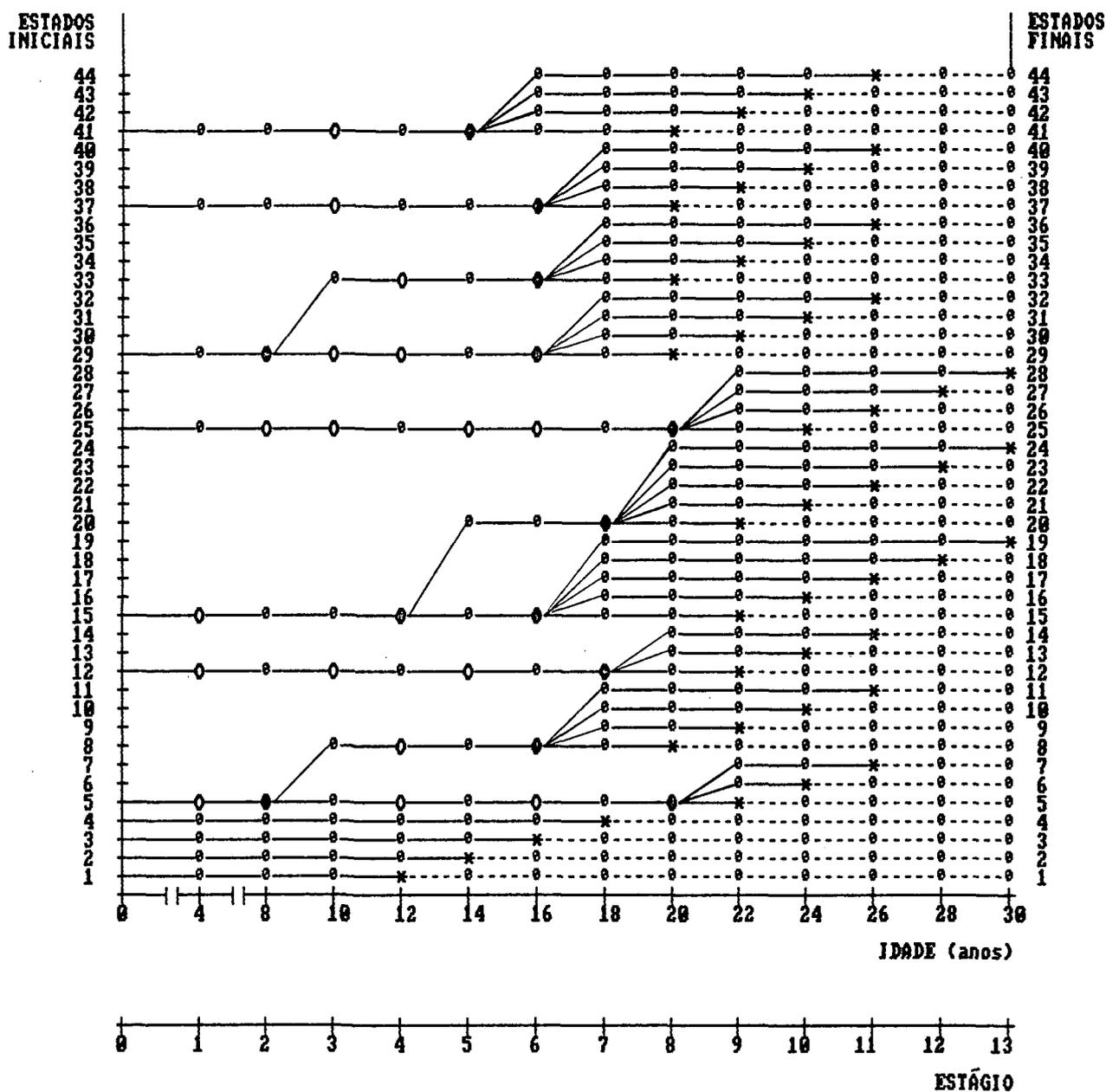
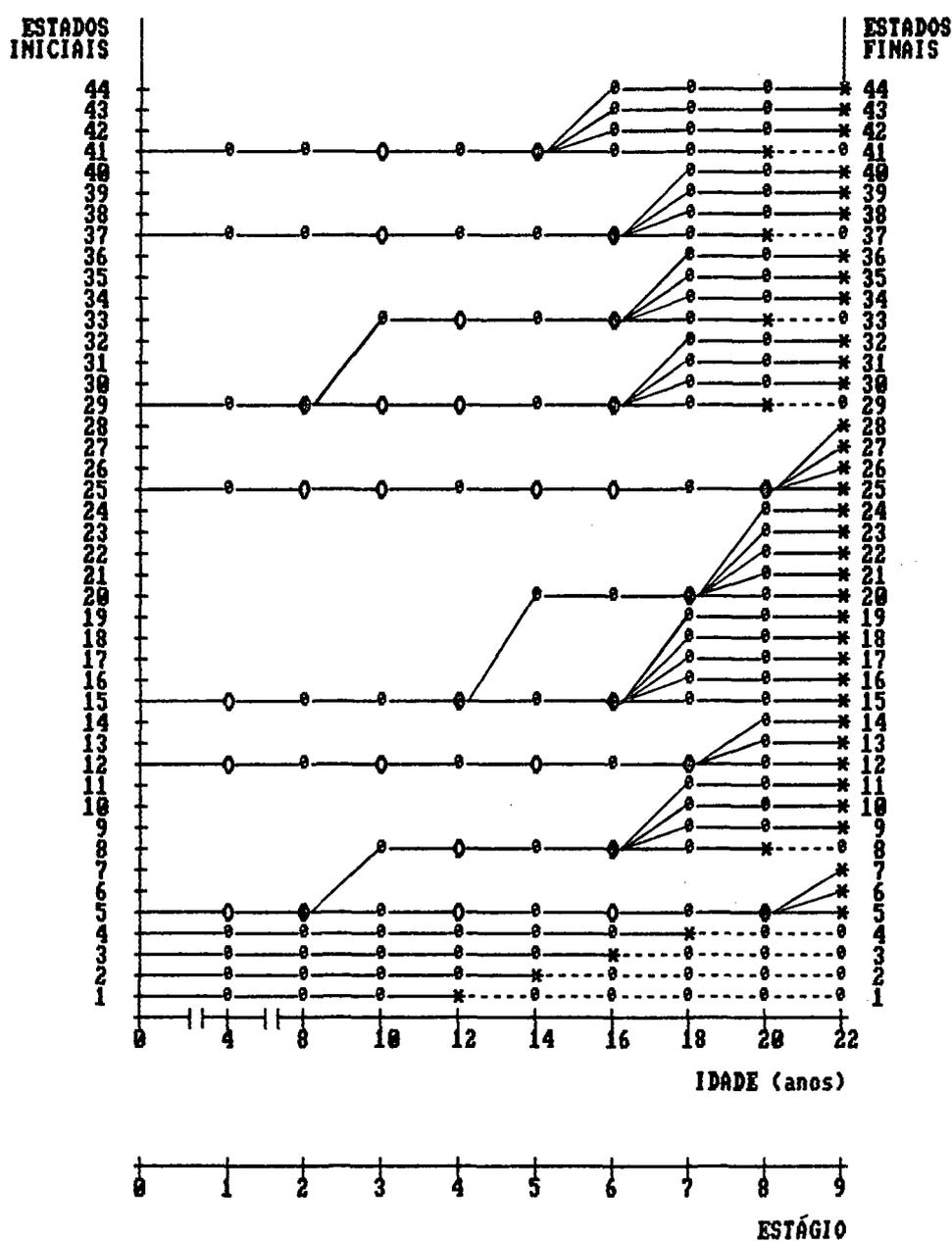


FIGURA 10. ESTRUTURA DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO SEGUNDO UM MODELO DE REDES COM 13 ESTÁGIOS.



- o Realização de um desbaste (pré-comercial ou comercial) durante a implementação de um determinado regime silvicultural.
- Realização de um desbaste comercial, e, simultaneamente, a decisão de mudar de regime silvicultural.
- e Nó artificial (retorno nulo)
- * Corte Final
- Arco real, associado ao fato de o sistema estar em um determinado regime silvicultural.
- Arco artificial, indicando o fato de que o corte final já foi realizado.

FIGURA 11. ESTRUTURA DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO SEGUNDO UM MODELO DE REDES COM 9 ESTÁGIOS.

fundamentais do problema.

5.5.2. A solução do problema em um microcomputador:

Muitos problemas de Programação Dinâmica são resolvidos de forma numérica procedendo-se à discretização dos estados, dos estágios e das variáveis de decisão. A relação de recursividade é invariavelmente representada através de uma equação matemática. Os cálculos necessários para se determinar uma política ótima de decisões são, com frequência, demorados e repetitivos. Nestas circunstâncias, o uso de um computador pode ser particularmente vantajoso.

Para facilitar a descrição do procedimento utilizado neste estudo, entretanto, a solução do problema poderia ter sido organizada em tabelas, representando a avaliação conduzida em cada estágio, como descrito anteriormente. Desta maneira, para um problema de dimensões reduzidas como este uma solução manual seria possível, sem maiores dificuldades. No entanto, muito embora a solução manual fosse suficiente para este estudo, decidiu-se pela elaboração de um programa para assim possibilitar a solução do problema em um microcomputador. Uma das maiores vantagens existentes no processamento do modelo de otimização em um microcomputador é a facilidade em se obter resultados para diferentes cenários, e particularmente, quando existe o interesse em se realizar um análise de sensibilidade das soluções.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Como caracterizado anteriormente, o problema solucionado neste trabalho de pesquisa é com frequência observado na silvicultura e no manejo de plantações de *Pinus* sp. na região Sul do Brasil. Apesar de suas dimensões reduzidas, este problema foi tratado na forma de um "Estudo de Caso" pela perspectiva da Pesquisa Operacional, fazendo uso de Programação Dinâmica para a sua solução. O problema examinado, segundo o número bastante restrito de regimes silviculturais incluídos na análise, é, no entanto, suficientemente simples e também completo, para permitir que se possa ilustrar alguns conceitos fundamentais e extremamente importantes acerca dos procedimentos utilizados assim como dos resultados obtidos.

6.1. O algoritmo de otimização associado à rede:

6.1.1. A equação de transição de estados:

Conforme apresentado anteriormente (item 5.3.4.), a formulação matemática generalizada é um "Modelo Simbólico" que permite uma representação abstrata do problema de silvicultura objeto deste estudo. Na "Equação de Transição de Estados" estão presentes as seguintes variáveis: os volumes de madeira antes e depois de qualquer desbaste, o volume de madeira removida em cada desbaste e no corte raso, assim como o crescimento do povoamento florestal que pode ser verificado entre quaisquer duas decisões

de corte.

No desenvolvimento deste estudo, entretanto, foi elaborado um "Modelo Analógico" do problema original, na forma das redes apresentadas nas Figuras 10 e 11. A "Equação de Transição de Estados", neste Modelo Analógico, presta-se à representação dos processos aos quais o sistema pode ser submetido.

Descreve-se, desta forma, a maneira como ocorre a passagem do sistema entre os nós admissíveis e sequencialmente contíguos, em um mesmo regime, ou em regimes diferentes, mas associados através de uma decisão de desbaste (ou seja, uma decisão de "mudança de regime"). A "Equação de Transição de Estados" que possibilita esta passagem entre os nós da rede é apresentada como segue:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k) \quad (\text{eq. 6.1})$$

onde:

- $\mathbf{x}(k)$: um nó (ou estado) da rede, no estágio k .
- $\mathbf{u}(k)$: uma decisão (possibilidade de mudança de regime).
 $\mathbf{u}=0, 1, 2, 3, 4, 5$.
 $\mathbf{u}=0$ existe uma passagem entre "nós", em um mesmo regime.
 $\mathbf{u}<>0$ indica a passagem de um nó em um regime para outro nó em um outro regime (no presente estudo admite-se somente $\mathbf{u}(k) >0$)

6.1.2. O processamento do modelo em um microcomputador:

Por não existir uma forma canônica satisfatória para representar todos os possíveis modelos de Programação Dinâmica, não existe também um programa de computador que possa ser utilizado de forma generalizada. Nestas circunstâncias torna-se necessário conceber um algoritmo específico para cada caso em particular.

Durante o desenvolvimento deste estudo constatou-se que uma "Solução Manual" poderia ser facilmente produzida. Considerando, entretanto, as evidentes vantagens em se dispor de um instrumento de análise para utilização em outros problemas de mesma natureza básica, decidiu-se pela elaboração de um programa de computar que possibilitasse, desta forma, a solução do problema de otimização objeto deste estudo através do uso de um microcomputador.

Entendeu-se também ser apropriado indicar e descrever os componentes mais relevantes que devem ser considerados ao se escrever o conjunto de rotinas e comandos necessários. Desta forma deve-se enfatizar que o processo de avaliação da relação de recorrência inerente aos problemas de Programação Dinâmica contém a mesma estrutura hierárquica de laços:

- a) um laço externo, global, para examinar cada estágio;
- b) um laço intermediário para avaliar os valores das somas dos retornos parciais para cada estado, selecionando o valor ótimo (i.e., máximo, neste estudo) com base no Princípio de Otimalidade de Bellman;
- c) um laço interno que possibilita o cálculo do retorno resultante de uma decisão que possa ser tomada em cada estado, aplicando-se a Função Critério.

Os elementos que certamente poderão ser modificados de problema para problema são a forma da "Função Critério" e a "Função de Transformação do Sistema entre Estados". No presente estudo, esta função Critério foi substituída por uma tabela que fornece os valores dos retornos monetários associados a cada decisão que possa ser tomada em cada estado ou nó de decisão.

O programa "DINÂMICA", disponível no Departamento de

Matemática da Universidade Federal do Paraná, UFPR, foi utilizado como base para o desenvolvimento do programa de computador produzido como um dos resultados do presente estudo. Este programa foi utilizado para a determinação da solução ótima neste trabalho de pesquisa. O programa adaptado automatiza a execução do algoritmo de otimização descrito na sequência.¹⁹

6.1.3. Descrição detalhada do algoritmo desenvolvido:

Os comentários abaixo relacionados referem-se às chamadas numeradas sequencialmente na Figura 12, identificando os seguintes componentes ou módulos:

(1) Inicialização do programa através da leitura de arquivos previamente gravados.

(2) Um laço externo global, que permite o exame de todos os estágios, de forma sequenciada e recursiva, para trás.

(3) Um "Teste de Parada", indicando o estágio inicial da rede: a terra nua antes de qualquer atividade referente à implantação do povoamento florestal. Quando este estágio artificial for alcançado, encerra-se o processo de análise uma vez que a solução ótima já terá sido identificada. Caso contrário, o conjunto de procedimentos internos a este laço continua sendo executado, de forma recursiva, estágio após estágio, até que toda a rede seja examinada.

(4) Inicialização dos índices que identificam o estado factível, dentro de um determinado estágio objeto de avaliação:

¹⁹O programa "DINÂMICA" foi escrito em Turbo Pascal por Lúcio Tunes dos Santos, durante os seus estudos de Pós-Graduação desenvolvidos no Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação, IMECC, na Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP. Na adaptação daquele programa aos propósitos do presente estudo contou-se com a valiosa colaboração do Bel. em Informática Augusto Nakao, programador do Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, CNPFlorestas, da EMBRAPA.

- i: Valor escalar inteiro que indica, na matriz $X[k,i]$, a posição de um estado factível $x[k,i]$, no estágio "k". Na matriz $U[k,i]$, arquivo NDEST.PRN (Tabela 3), "i" indica a posição do registro do número de decisões admissíveis $u[k,i]$ relativas ao estado presente $x[k,i]$.
- p: Valor escalar inteiro que indica a posição de um estado $x[k+1,p]$, localizado no estágio "k+1", para o qual pode-se conduzir o sistema a partir de um estado $x[k,i]$, no estágio "k", tendo-se tomado uma das decisões dentre aquelas indicadas por $u = 0,1,\dots, u[k,i]$. Ou seja, "p" fornece a posição dos futuros estados em que o sistema poderia se encontrar após a tomada das decisões disponíveis para avaliação no estado presente $x[k,i]$. Os valores para "p" e "i" pertencem ao conjunto de estados admissíveis $\{1,\dots,44\}$, sendo "p" \geq "i", e são recuperados na mesma matriz de estados factíveis, $X[k,i]$ ou $X[k+1,p]$, contida no arquivo NEFAC.PRN (Tabela 4).

(5) Laço intermediário que permite sejam percorridos todos os estados dentro de um estágio (até que se encontre o valor zero), na matriz $X[k,i]$, arquivo NEFAC.PRN (Tabela 4).

(6) Avaliação de todos os estados factíveis, no estágio "k+1", conforme o número de decisões factíveis no estado $x[k,i]$ fornecido em $u[k,i]$, selecionando a melhor decisão que transforma o sistema do estado $x[k,i]$, no estágio "k", para o estado $x[k+1,p]$, no estágio "k+1". O regime parcial ótimo (ou, política parcial ótima de decisões), dentre aquele conjunto de decisões alternativas, é memorizado em "m". A posição do estado associado à decisão ótima parcial, para aquele estágio "k", é armazenada em "NN". Ou seja, "NN" registra o "Regime Silvicultural Tronco" a partir do qual ramificam-se as decisões de desbaste ou de corte final. "AUX" recebe o valor monetário acumulado correspondente à política parcial ótima.

(7) Laço interno: percorre todos os estados do estágio "k+1", para os quais pode-se conduzir o sistema se as decisões factíveis forem tomadas.

(8) Teste de comparação dos retornos $t[[k+1],x[k+1,p],2]$ no estágio "k+1", associados aos estados decorrentes para as decisões tomadas no estado $x[k,i]$, no estágio "k", escolhendo-se a melhor decisão. O maior valor para "t" é memorizado em "AUX". O estado correspondente, ou regime silvicultural, é armazenado em "m". Ou seja, "m" memoriza o estado $x[k+1,p]$ para o qual a melhor decisão conduz o sistema. De forma análoga, o valor do retorno associado àquela decisão, recuperado da matriz $T[k+1,x[k+1,p],2]$, é armazenado em "AUX".

(9) Substituição do número índice do estado presente pelo número índice do melhor estado até então selecionado. "J" percorre todos os estágios, do estágio "0" até o estágio "k". Desta forma, substitue-se os identificadores de todos os estados naquele segmento da rede (i.e. um conjunto de arcos) pelo valor que identifica a melhor decisão parcial de decisões até aquele estágio. Este procedimento é executado sobre todos os estados factíveis no referido estágio.

(10) Atualização do valor ótimo parcial acumulado da Função Objetivo, armazenando-se na primeira posição da terceira componente da matriz T, o endereço da política parcial ótima, do estado-destino (i.e. final) até o estado presente, localizado no estágio "k". Prossegue-se para a continuidade do procedimento de avaliação do próximo estado, ainda no mesmo estágio "k".

(11) Obtenção da política parcial ótima de qualquer estado até o estado final. Um módulo para recuperação da trajetória poderia ser incluído neste ponto, mas isto não se faz necessário neste estudo uma vez que o processo carrega consigo a informação referente ao estado final ótimo, de onde se originou o processo, recursivamente, para trás.

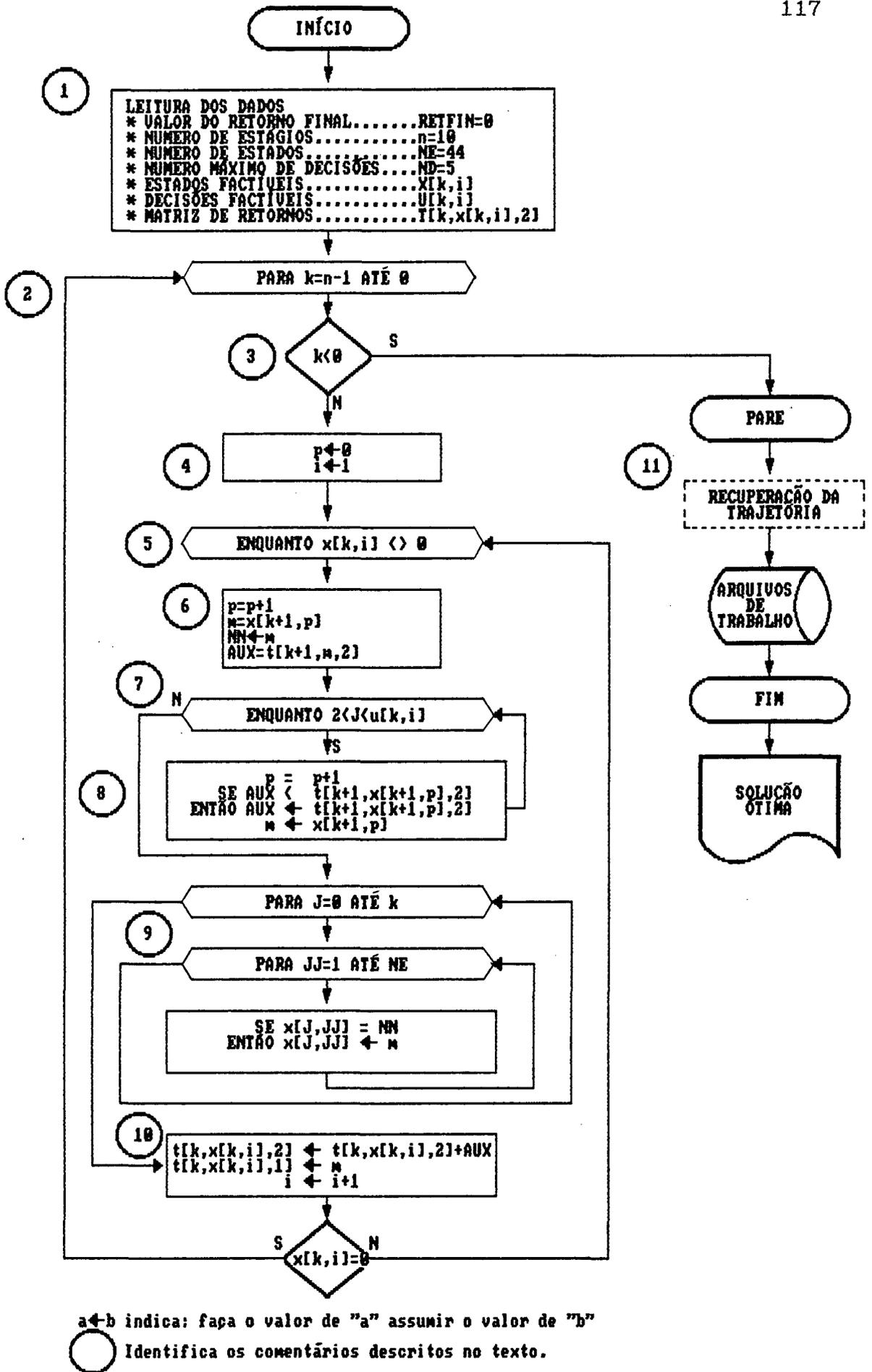


FIGURA 12. ESTRUTURA DO ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO.

6.2. Programação Dinâmica vs. Enumeração Total:

As vantagens comparativas de Programação Dinâmica em relação à Enumeração Total (por vezes denominada Inspeção Total) são caracterizadas como segue.

O estudo de caso relatado neste documento foi concebido de modo que apresentasse uma estrutura simples o suficiente para possibilitar uma análise detalhada de diferentes componentes do problema assim como da sua solução. De forma análoga, a estrutura do estudo permitiu o exame e a descrição do procedimento computacional passo a passo.

Devido às modestas dimensões do problema, ficou evidenciada a validade de se proceder à inspeção total (fazendo uso de uma Planilha Eletrônica) para a identificação de uma solução ótima global para o problema. Na Tabela 5 apresentam-se os resultados para a determinação do Valor Esperado da Terra para todos os 44 regimes silviculturais, através de Enumeração Total. O regime de número 37 foi aquele que propiciou o mais elevado valor para o critério utilizado (VET=US\$270,46). Este é, portanto, o "Regime Silvicultural Otimo".

Nas Tabelas 6 e 7, produzidas em resultado ao uso do programa de computador, e que incorpora o algoritmo desenvolvido, apresenta-se a solução obtida para o problema via Programação Dinâmica. A solução ótima encontrada foi também o regime silvicultural de número 37, aquele que apresenta o mais elevado valor acumulado para o Valor Esperado da Terra, obtido, entretanto, de forma cumulativa, após o exame de toda a rede.

TABELA 5. ORDENAMENTO DOS REGIMES SILVICULTURAIS SEGUNDO O VALOR ESPERADO DA TERRA (VET, US\$/ha): SOLUÇÃO VIA ENUMERAÇÃO TOTAL.

REGIME	ESTÁGIO (IDADE)										VET
	0 (0)	1 (4)	2 (8)	3 (10)	4 (12)	5 (14)	6 (16)	7 (18)	8 (20)	9 (22)	
37	-789,84	0,00	0,00	202,04	0,00	0,00	356,93	0,00	501,33	0,00	270,45
38	-768,17	0,00	0,00	192,44	0,00	0,00	339,98	0,00	0,00	497,40	261,65
39	-750,54	0,00	0,00	184,64	0,00	0,00	326,20	0,00	0,00	471,48	231,77
3	-851,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1058,52	0,00	0,00	0,00	207,06
42	-768,17	0,00	0,00	233,41	0,00	222,84	0,00	0,00	0,00	515,64	203,71
40	-736,02	0,00	0,00	178,21	0,00	0,00	314,84	0,00	0,00	434,58	191,62
2	-896,66	0,00	0,00	0,00	0,00	1087,32	0,00	0,00	0,00	0,00	190,65
41	-789,84	0,00	0,00	245,04	0,00	233,94	0,00	0,00	499,29	0,00	188,43
33	-789,84	0,00	104,39	0,00	127,46	0,00	228,23	0,00	517,41	0,00	187,64
34	-768,17	0,00	99,43	0,00	121,41	0,00	217,39	0,00	0,00	510,08	180,13
4	-816,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	994,42	0,00	0,00	177,50
29	-789,84	0,00	104,39	69,37	89,91	0,00	126,98	0,00	569,52	0,00	170,32
30	-768,17	0,00	99,43	66,08	85,64	0,00	120,96	0,00	0,00	559,82	163,75
35	-750,54	0,00	95,40	0,00	116,48	0,00	208,58	0,00	0,00	484,60	154,52
44	-736,02	0,00	0,00	216,15	0,00	206,36	0,00	0,00	0,00	466,28	152,77
43	-750,54	0,00	0,00	223,94	0,00	213,80	0,00	0,00	0,00	459,34	146,54
25	-750,54	0,00	89,98	126,80	0,00	77,24	72,92	0,00	63,77	465,57	145,75
31	-750,54	0,00	95,40	63,40	82,17	0,00	116,05	0,00	0,00	537,07	143,55
36	-736,02	0,00	92,08	0,00	112,43	0,00	201,32	0,00	0,00	468,95	138,76
26	-736,02	0,00	86,85	122,39	0,00	74,55	70,38	0,00	61,55	451,35	131,05
1	-957,89	0,00	0,00	0,00	1071,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	113,55
32	-736,02	0,00	92,08	61,19	79,30	0,00	112,01	0,00	0,00	499,66	108,24
27	-723,91	0,00	84,24	118,71	0,00	72,31	60,27	0,00	59,70	420,66	107,97
28	-713,73	0,00	82,05	115,62	0,00	70,42	66,49	0,00	58,14	395,70	74,68
8	-789,84	-46,04	98,92	0,00	129,26	0,00	163,59	0,00	463,50	0,00	19,38
9	-768,17	-43,85	94,22	0,00	123,13	0,00	155,83	0,00	0,00	445,36	6,50
15	-768,17	-65,78	0,00	0,00	146,51	0,00	206,77	0,00	0,00	468,98	-11,69
10	-750,54	-42,08	90,40	0,00	118,13	0,00	149,51	0,00	0,00	407,85	-26,73
5	-768,17	-43,85	94,22	0,00	92,86	0,00	126,13	0,00	100,77	366,42	-31,62
13	-750,54	-52,59	0,00	85,65	0,00	143,91	0,00	163,54	0,00	372,75	-37,30
12	-768,17	-54,82	0,00	89,27	0,00	149,99	0,00	170,45	0,00	372,95	-40,34
11	-736,02	-40,61	87,25	0,00	114,02	0,00	144,30	0,00	0,00	389,93	-41,12
21	-750,54	-63,11	0,00	0,00	140,57	0,00	0,00	207,50	0,00	420,64	-44,94
14	-736,02	-50,76	0,00	82,67	0,00	138,89	0,00	157,84	0,00	357,25	-50,13
6	-750,54	-42,08	90,40	0,00	89,10	0,00	121,02	0,00	96,69	344,22	-51,20
20	-768,17	-65,78	0,00	0,00	146,51	0,00	0,00	216,27	0,00	411,94	-59,23
17	-736,02	-60,92	0,00	0,00	135,68	0,00	191,48	0,00	0,00	405,99	-63,79
16	-750,54	-63,11	0,00	0,00	140,57	0,00	198,39	0,00	0,00	404,08	-70,62
22	-736,02	-60,92	0,00	0,00	135,68	0,00	0,00	200,28	0,00	388,00	-72,18
23	-723,91	-59,08	0,00	0,00	131,60	0,00	0,00	194,26	0,00	372,72	-84,42
7	-736,02	-40,61	87,25	0,00	85,99	0,00	116,00	0,00	93,32	289,49	-103,77
24	-713,73	-57,54	0,00	0,00	128,17	0,00	0,00	189,19	0,00	343,52	-110,39
18	-723,91	-59,08	0,00	0,00	131,60	0,00	185,72	0,00	0,00	353,99	-111,68
19	-713,73	-57,54	0,00	0,00	128,17	0,00	180,88	0,00	0,00	346,47	-115,75

TABELA 6. MATRIZ DE RETORNOS ACUMULADOS $T[k, x[k, i], 2]$.

REGIME	ESTÁGIO (IDADE)										
	REGIME	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ÓTIMO	(0)	(4)	(8)	(10)	(12)	(14)	(16)	(18)	(20)	(22)
1		113,54	1071,43	1071,43	1071,43	1071,43					
2		190,66	1087,32	1087,32	1087,32	1087,32	1087,32				
3		207,06	1058,52	1058,52	1058,52	1058,52	1058,52	1058,52			
4		177,49	994,42	994,42	994,42	994,42	994,42	994,42	994,42		
5		-768,17	-43,85	413,98	319,76	319,76	226,90	226,90	100,77	100,77	366,42
6		-750,54	-42,08	90,40		89,10		121,02		96,69	344,22
7		-736,02	-40,61	87,25		85,99		116,80		93,32	289,49
8		19,39	809,23	855,27	756,35	756,35	627,09	627,09	463,50	463,50	
9		-768,17	-43,85	94,22		123,13		155,83			445,36
10		-750,54	-42,08	90,40		118,13		149,51			407,85
11		-736,02	-40,61	87,25		114,02		144,30			389,93
12		-413,28	354,89	409,71	409,71	320,44	320,44	170,45	170,45		372,95
13		-750,54	-52,59		85,65		143,91		163,54		372,75
14		-736,02	-50,76		82,67		138,89		157,84		357,25
15		-768,17	-65,78			353,28	206,77	206,77			468,98
16		-750,54	-63,11			140,57		198,39			404,08
17		-736,02	-60,92			135,68		191,48			405,99
18		-723,91	-59,08			131,60		185,72			353,99
19		-713,73	-57,54			128,17		180,88			346,47
20		-471,17	297,00	362,78	362,78	362,78	216,27	216,27	216,27		411,94
21		-750,54	-63,11			140,57			207,50		420,64
22		-736,02	-60,92			135,68			200,28		388,80
23		-723,91	-59,08			131,60			194,26		372,72
24		-713,73	-57,54			128,17			189,19		343,52
25		-319,83	430,71	430,71	340,73	213,93	213,93	136,69	63,77	63,77	465,57
26		-736,02		86,85	122,39		74,55	70,38		61,55	451,35
27		-723,91		84,24	118,71		72,31	68,27		59,70	428,66
28		-713,73		82,05	115,62		70,42	66,49		58,14	395,70
29		-789,84		960,17	855,78	786,41	696,50	696,50	569,52	569,52	
30		-768,17		99,43	66,08	85,64		120,96			559,82
31		-750,54		95,40	63,40	82,17		116,05			537,07
32		-736,02		92,08	61,19	79,30		112,01			499,66
33		187,65	977,49	977,49	873,10	873,10	745,64	745,64	517,41	517,41	
34		-768,17		99,43		121,41		217,39			510,08
35		-750,54		95,40		116,48		208,58			484,60
36		-736,02		92,08		112,43		201,32			468,95
37	270,46	270,46	1060,30	1060,30	1060,30	858,26	858,26	858,26	501,33	501,33	
38		-768,17			192,44			339,98			497,40
39		-750,54			184,64			326,20			471,48
40		-736,02			178,21			314,84			434,58
41		188,43	978,27	978,27	978,27	733,23	733,23	499,29	499,29	499,29	
42		-768,17			233,41			222,84			515,64
43		-750,54			223,94			213,80			459,34
44		-736,02			216,15			206,36			466,28

TABELA 7. MATRIZ DE RECUPERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS $T[k, [k, i], 1]$.

REGIME	ESTÁGIO (IDADE)									
	0 (0)	1 (4)	2 (8)	3 (10)	4 (12)	5 (14)	6 (16)	7 (18)	8 (20)	9 (22)
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		2	2	2	2	2	2	2	2	2
3		3	3	3	3	3	3	3	3	3
4		4	4	4	4	4	4	4	4	4
5				5	5	5	5	5	5	5
6										6
7										7
8		8	8	8	8	8	8	8	8	8
9								9	9	9
10								10	10	10
11								11	11	11
12		12	12	12	12	12	12	12	12	12
13									13	13
14									14	14
15						15	15	15	15	15
16								16	16	16
17								17	17	17
18								18	18	18
19								19	19	19
20		20	20	20	20	20	20	20	20	20
21									21	21
22									22	22
23									23	23
24									24	24
25		25	25	25	25	25	25	25	25	25
26										26
27										27
28										28
29				29	29	29	29	29	29	29
30								30	30	30
31								31	31	31
32								32	32	32
33		33	33	33	33	33	33	33	33	33
34								34	34	34
35								35	35	35
36								36	36	36
37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
38								38	38	38
39								39	39	39
40								40	40	40
41		41	41	41	41	41	41	41	41	41
42							42	42	42	42
43							43	43	43	43
44							44	44	44	44

Há que se ressaltar o esforço computacional requerido para a determinação da solução ótima em cada um dos dois métodos utilizados. Ao se solucionar o problema através de Enumeração Total foi necessária a realização de 440 operações de soma de retornos monetários, enquanto que o uso de Programação Dinâmica implicou em apenas 206 daquelas operações. Muito embora o número de comparações realizadas seja de 44 e 57, para Enumeração Total e para Programação Dinâmica, respectivamente, o algoritmo desenvolvido é bastante rápido, quando comparado à Inspeção Total.

Quando a solução não exige um rigor técnico e acadêmico, a aplicação de Enumeração Total é suficiente. Este fato fica mais caracterizado principalmente quando se considera o grau de risco associado com as estimativas de produção de madeira, custos e preços. Desta forma pode-se produzir uma solução satisfatória para o problema. Nos objetivos deste estudo, entretanto, não se considerou simplesmente "selecionar", o melhor regime silvicultural, mas, sim, alcançar este resultado através do desenvolvimento e da aplicação de um modelo de Programação Dinâmica. Adicionalmente, além de viabilizar a determinação da solução ótima para o problema examinado, o desenvolvimento deste estudo possibilitou a descrição do grande potencial e da flexibilidade do uso de Programação Dinâmica para a solução desta classe de problemas de decisão.

6.3. A solução ótima e as hipóteses de trabalho:

Como é frequentemente observado em estudos desta natureza, o trabalho de pesquisa reportado neste documento foi desenvolvido assumindo-se determinadas condições básicas, conforme descritas na sequência:

a) A solução ótima encontrada para o problema implícito a este estudo é efetivamente a melhor dentre aquelas soluções alternativas que foram consideradas na análise. Eventualmente, no entanto, um outro regime silvicultural poderia existir, superior para o critério de decisão adotado (VET), mas que não tivesse sido incluído no conjunto de soluções examinadas.

Sob a ótica da Engenharia Florestal, entretanto, os regimes silviculturais contemplados no estudo representam uma amplitude bastante razoável de alternativas operacionais. Adicionalmente, o estudo teve como propósito examinar regimes de desbaste que têm sido efetivamente praticados na silvicultura de *Pinus taeda* nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

b) Deve-se entender também que a solução encontrada é "a solução ótima", mas somente para as condições inicialmente adotadas no estudo: custos (de plantio, de realização dos tratamentos culturais, de execução dos desbastes e do corte final, assim como de administração), preços da madeira por categoria de matéria-prima (sortimento), e taxa de juros. A alteração de algum destes elementos poderia conduzir a uma outra solução ótima. Para

verificar esta possibilidade seria desejável proceder a uma análise de sensibilidade da solução. Ou seja, seria necessário verificar em que espectro ou amplitude de variação daqueles fatores, a solução ótima continuará sendo "ótima". Programação Dinâmica, entretanto, não possibilita tal análise, como é comumente realizado em Programação Linear.

c) Possíveis efeitos diferenciados do "risco" sobre valores futuros de preço e custos, assim como a ocorrência de inflação foram ignorados durante a análise. Por este motivo, a taxa de juros não foi ajustada quer por um fator de risco, quer por alguma expectativa de inflação. Entendeu-se que, muito embora estes fatores efetivamente ocorram na prática de qualquer atividade econômica, a sua inclusão, neste estudo, poderia tornar a apreciação técnico-científica do problema extremamente complexa, senão impraticável.

A omissão destes fatores, na análise, não os torna, entretanto, menos importantes. Em sua essência, tais fatores foram aqui tratados como elementos de perturbação, uma vez que a preocupação maior do estudo foi somente a de documentar a aplicação de PD a este problema típico de Silvicultura e Manejo, considerando, entretanto, um enfoque determinístico.

6.4. Particularidades do problema e do modelo:

6.4.1. A discretização do tempo:

Objetivando uma representação fiel e completa da natureza do problema objeto deste estudo seria necessário tratar o "tempo" como uma variável contínua. Uma formulação discretizada do problema, entretanto, é não apenas suficiente, como também mais adequada. Esta forma para tratar o problema está justificada no fato de que, na prática da silvicultura e do manejo florestal, as entradas e saídas de um sistema (i.e. as decisões de plantio, manutenção, e de cortes, parcial ou total, implicando em receitas e custos) ocorrem em momentos específicos (i.e. segundo valores discretizados) e não de forma contínua, ao longo da rotação. Ademais, a discretização do tempo, em estágios de decisão, é uma das condições necessárias para a aplicação de Programação Dinâmica.

Para a identificação dos estágios assim como para a sua numeração ordenada, o procedimento tradicional em Programação Dinâmica implica em se associar os estágios com o número de etapas de decisão que devem ser examinadas ($k=n, \dots, 0$) do estado-origem para o estado-destino. Aparentemente, esta forma convencionada na literatura tem como propósito facilitar a aplicação do raciocínio inerente à recursividade para trás. No presente estudo, entretanto, e conforme recomendado por alguns autores (KENNEDY⁸⁶), fez-se uso de uma ordenação ao reverso ($k=0, \dots, n$), uma vez que esta é suficiente para a aplicação do

método assim como também mais apropriada para a interpretação do procedimento computacional utilizado.

6.4.2. A natureza dos regimes silviculturais:

Em contraposição aos trabalhos que descrevem a solução de problemas referentes à "eventual" prática de desbastes que reduzem o volume de madeira ou a área basal do povoamento para valores residuais pré-estabelecidos, o "Estudo de Caso" relatado neste trabalho utilizou como critério de desbaste o número de árvores por hectare, e a sua redução segundo valores percentuais absolutos desejáveis para a densidade da população remanescente expressa em N/ha. Entende-se que a prática da Silvicultura nos estados da região Sul do Brasil tem sido efetivada desta forma, e, que, portanto, este é o procedimento mais adequado para este estudo.

Devido ao caráter didático de muitos livros em Manejo Florestal (DYKSTRA⁵², DAVIS & JOHNSON⁴⁸,; BUONGIORNO & GILLES²⁶) os exemplos apresentados devem ser simples, e estruturados de uma maneira tal que facilite o seu entendimento pelo leitor. Neste esforço de simplificação, no entanto, aqueles autores apresentam situações fictícias e que dificilmente poderiam ser verificadas na prática da Silvicultura na região de interesse deste estudo. Desta forma, uma das características inovadoras do presente estudo foi a de examinar regimes silviculturais que não são somente factíveis mas certamente operacionais. Uma vez que esta pesquisa foi desenvolvida na forma de um "Estudo de Caso",

decidiu-se considerar um número restrito de regimes silviculturais, mas suficiente, no entanto, para caracterizar a essência do problema.

A consideração de um número elevado de regimes silviculturais alternativos, no desenvolvimento deste "Estudo de Caso", implicaria em um aumento desnecessário nas dimensões do problema, apesar de não conduzir a modificações na sua estrutura matemática. Da mesma forma, neste caso, o programa de computador desenvolvido não iria necessitar de profundas alterações, a não ser, talvez, uma nova especificação para o número de estágios e de estados, e uma redefinição da matriz de retornos.

No uso deste modelo, entretanto, assim como no futuro desenvolvimento de estudos semelhantes, convém considerar o seguinte fato: quanto mais numerosas forem as possibilidades alternativas para se desbastar um povoamento florestal (em intensidade e em método), em uma ou mais idades, durante rotações opcionais, maior será a justificativa para a utilização de Programação Dinâmica. Para justificar o uso deste método de solução, entretanto, seria conveniente dispor de mais nós intermediários de decisão (quando, em consequência a um determinado desbaste, pelo menos dois ou mais regimes silviculturais pudessem ser diferenciados a partir de então. Quando esta situação puder ser verificada, manifesta-se a necessidade de "nós" e de "arcos" adicionais na rede.

A simples inclusão de mais regimes silviculturais, exclusivos e independentes, no entanto, jamais será condição

suficiente para que novos nós intermediários de decisão possam ser identificados. É desejável, portanto, que os regimes considerados tenham uma "história comum", desde o plantio até uma idade futura qualquer, a partir da qual os regimes possam ser individualizados (como em uma "árvore de decisão", quando a estrutura da rede se assemelha a algo como um conjunto de chaves bifurcadas ou "árvore binária", com até "n" possíveis decisões).

6.4.3. As decisões de desbaste e os retornos monetários:

Um exame do conjunto de regimes silviculturais incluídos neste estudo (Figura 4.), representado pelo modelo analógico apresentado nas Figuras 10 e 11, revela a existência de diversas oportunidades para "mudança de regime", através de uma decisão de desbaste ou de corte final. Em tais oportunidades, os retornos associados às diferentes alternativas de corte são avaliados comparativamente e de forma recursiva.

Um regime silvicultural que não permita alternativas para a realização de desbaste(s) e/ou idades para o corte final, não representa, em sua individualidade, um "problema de decisões sequenciadas". Ou seja, torna-se necessária a existência simultânea de pelo menos duas alternativas para que um problema de decisão possa ser efetivamente caracterizado. O simples sequenciamento linear e cronológico de operações de desbaste, ao longo de um horizonte de planejamento, jamais poderá ser tratado como um problema de decisões, e muito menos, como um problema de decisões interrelacionadas. Neste caso, o regime de desbastes

será, quando muito, simplesmente implementado, se desejável e conveniente (uma vez que não há sobre o que se decidir!).

Muito embora o retorno monetário associado a uma determinada decisão deva ser necessariamente avaliado, para alguns regimes silviculturais existem retornos que devem ser incorporados de forma automática à análise (i.e. retornos monetários implícitos) e que não são decorrentes de uma decisão propriamente dita. Este é o caso, por exemplo, dos custos de realização de desbastes pré-comerciais, como nos regimes 5 a 24, ou dos custos de desbastes comerciais nos regimes 5 a 44. Muito embora não exista nenhuma decisão a ser tomada nestes casos, a ocorrência daqueles eventos não pode ser ignorada no procedimento de cálculo do retorno cumulativo de uma política (parcial ou global) ótima.

6.4.4. O "Princípio de Otimidade de Bellman":

A condição implícita ao "Princípio de Otimidade de Bellman" indica que uma política ótima de decisões é formada, necessariamente, por subpolíticas ótimas (i.e. políticas parciais ótimas). Uma interpretação deste princípio básico em PD, no contexto dos problemas de otimização simultânea das decisões de desbaste e de corte final, é reportada por MARTIN & EK⁹⁷, como segue (estes autores utilizaram a formulação "forward"):

"Um regime de desbastes 'ótimo' deve possuir a seguinte propriedade: quaisquer que sejam as próximas decisões de desbaste, a partir da presente condição de densidade de um povoamento florestal, as decisões anteriores de desbaste, e que conduziram o povoamento até a presente condição, devem se constituir em uma política parcial ótima."

Ao se discutir a aplicação deste princípio ao procedimento de solução adotado para o problema objeto deste estudo, convém observar, no entanto, a seguinte particularidade.

Como enfatizado anteriormente, o fato de um povoamento florestal encontrar-se em uma determinada condição, em um determinado momento (sendo, portanto, descrito por uma variável ou vetor de estado), é consequência cumulativa das decisões que foram tomadas anteriormente, durante a história do processo ao qual o sistema foi submetido. Isto é, uma determinada decisão de desbaste, em termos de idade, método e intensidade especificadas, gerou uma consequência imediata no sistema, produzindo o povoamento "remanescente" à intervenção realizada. Durante o tempo decorrido entre a realização de dois desbastes, fatores que afetam o crescimento atuaram sobre as árvores (individualmente) e, portanto, sobre o povoamento florestal (coletivamente), levando o sistema à uma nova condição, anos mais tarde.

O "Princípio de Otimidade" estabelece, no entanto, que uma política ótima de decisões, do momento presente até o nó terminal da rede (neste estudo, a idade de rotação) é independente do conhecimento das decisões que conduziram o sistema até a condição presente, ou seja: uma subpolítica ótima não depende da política anterior de decisões já tomadas. O conceito de recursividade, deduzido a partir do conceito de otimidade, reflete e formaliza exatamente esta relação de dependência recursiva: a descrição presente do sistema em um determinado estado, em um determinado estágio, é suficiente para possibilitar a determinação das

decisões ótimas remanescentes.

6.5. Implementação da solução ótima:

Por melhor que sejam elaborados, Planos de Manejo, e todas as prescrições de silvicultura que estes possam eventualmente incorporar, não são por si só, suficientes para propiciar um aumento na eficiência econômica. Obviamente, para que possam atingir seus objetivos, Planos de Manejo precisam ser implementados! Quando, no entanto, os resultados de um modelo de otimização devem ser incorporados à prática da silvicultura, é importante que algumas das características do modelo sejam consideradas.

O Simulador de Crescimento e de Produção assume que todas as árvores dispõem de troncos isentos de defeitos e imperfeições. Entretanto, uma vez que na realidade as árvores podem apresentar muitos defeitos, e que limitam a sua utilização comercial, deve-se entender que o valor de uma política ótima de decisões dificilmente será obtido na prática. Adicionalmente, há que se considerar o fato de que o Simulador de Crescimento e de Produção foi desenvolvido a partir de uma determinada base de dados. É muito pouco provável que o povoamento florestal, cuja silvicultura é objeto de otimização, pertença àquela população originalmente amostrada. Este obstáculo também condiciona a efetiva verificação do valor da solução ótima na prática. Adicionalmente, com frequência, povoamentos florestais têm algum grau de heterogeneidade, o que pode limitar, de alguma maneira, a

efetiva implementação do regime silvicultural ótimo.

Por outro lado, o fato de que através de um modelo, como o desenvolvido neste estudo, seja possível obter uma definição acerca da estratégia ótima para a realização de desbastes e do corte final, não elimina a possibilidade de que um proprietário florestal examine as condições do mercado para madeira, assim como as suas próprias necessidades financeiras. Ou seja, considerações referentes ao fluxo de caixa, ou oportunidades de mercado, por exemplo, poderão levar um proprietário florestal a realizar um desbaste ou um corte final segundo outras especificações que aquelas indicadas pelo modelo.

Em contraposição à existência de algumas condicionantes, como anteriormente mencionadas, deve-se também ressaltar alguns importantes benefícios decorrentes da existência do modelo desenvolvido. Muito embora o instrumento desenvolvido neste estudo seja, na sua essência, um "Modelo de Otimização", este certamente poderá ser utilizado, no entanto, como um "Modelo de Simulação", integrando elementos físicos sobre crescimento e produção, com informações de natureza econômico-financeira. Desta maneira será possível proceder a uma análise de sensibilidade da solução ótima, mantendo-se constante determinados valores, e fazendo alterar os preços de diferentes categorias de madeira, por exemplo (i.e., considerando diferentes cenários: otimista, neutro e pessimista).

Desta forma, um modelo de otimização sempre será um instrumento valioso, particularmente no sentido de que, na sua

ausência, decisões serão tomadas de qualquer forma, muitas vezes, no entanto, senão em bases empíricas, certamente com informações subjetivas. Desta maneira, em Manejo Florestal, os benefícios e as vantagens de se dispor do conhecimento de uma política ótima de decisões frequentemente vão muito além do resultado numérico imediato apenas. Como já discutido anteriormente, o maior mérito dos modelos matemáticos é a possibilidade do seu uso na condição de instrumentos de suporte ao processo de tomada de decisões, antes que estas decisões sejam tomadas.

6.6. Alternativas para a estruturação do problema:

Este estudo deve ser tratado como exploratório nesta área de conhecimento. Algumas possibilidades foram portanto identificadas para a realização de esforços complementares de pesquisa sobre o tema na forma de variações da natureza básica do problema descrito. Obviamente, estas variações implicam em se modificar a representação analógica dos problemas, assim como em introduzir novos conceitos e procedimentos de solução, como apresentado na sequência.

6.6.1. Variações para a estrutura básica proposta:

6.6.1.1. Otimização da produção do volume de madeira:

Se porventura o objetivo da análise ficasse restrito à maximização do volume produzido, algumas importantes modificações poderiam ser introduzidas. Primeiro, a análise poderia ser

iniciada à idade de quatro anos, uma vez que a história do sistema, até essa idade, seria idêntica para qualquer regime. Segundo, ao se descrever os estados utilizando somente o volume de madeira (total, comercial ou por sortimento), a definição dos estágios deveria então obrigatoriamente respeitar a idade da efetiva ocorrência dos eventos. Neste último caso não seria possível compactar o problema de 13 para 9 estágios, como realizado na formulação utilizada no estudo desenvolvido.

6.6.1.2. Uma única idade de rotação:

A utilização de somente uma idade de rotação, mas, dispondo-se ainda de um conjunto de regimes alternativos e de alguma maneira relacionados para a realização de desbastes teria como consequência imediata a possibilidade de usar o Valor Presente das Rendas Líquidas como critério de decisão. Adicionalmente haveria necessidade de um único estado inicial, assim como um único estado final, para a rede. O problema todo seria bastante simplificado, tanto na sua formulação como na sua solução.

Neste caso, o seguinte procedimento de análise poderia ser utilizado:

Descontar o valor monetário associado a cada arco para o início do horizonte de planejamento, e então solucionar o problema, via Programação Dinâmica, identificando o regime silvicultural que propicia o máximo Valor Presente das Rendas Líquidas (VPL). Se, por alguma razão, fosse desejável determinar o Valor Esperado da Terra (VET) associado à solução ótima determinada por VPL, bastaria apenas capitalizar o valor anteriormente calculado para o final da rotação, e, na sequência, proceder à sua descapitalização para a idade zero, refletindo o seu recebimento rotação após rotação, em perpetuidade. Em termos computacionais, neste caso deve-se, portanto,

multiplicar o valor do máximo VPL (associado ao regime silvicultural que viesse a ser identificado como o "ótimo") pelo Fator de Desconto FD_2 , como segue:

$$FD_2 = \{(1+i)^R / [(1+i)^R - 1]\} \quad (\text{eq. 6.2})$$

onde os símbolos têm o mesmo significado que na equação 5.7.

6.6.1.3. Espaçamentos iniciais alternativos:

A incorporação de diferentes densidades iniciais de mudas por hectare (ou, de forma análoga, de diferentes espaçamentos iniciais) requer algumas modificações na estrutura do modelo. Este seria, então, um modelo mais completo: permitindo-se variar o espaçamento inicial, a idade, o método e a intensidade de desbaste, assim como a idade de rotação.

Tomando como base o modelo desenvolvido neste estudo, seria necessário acrescentar um "nó artificial" externo à rede, antes do seu primeiro estágio. O estágio inicial deverá assim contemplar a possibilidade de que o sistema se encontre em uma das densidades iniciais alternativas, a partir de cada qual, a rede de regimes silviculturais alternativos poderia ter, por exemplo, uma estrutura semelhante àquela desenvolvida neste estudo, para cada espaçamento inicial considerado. A Figura 13 ilustra uma possível estrutura para este modelo modificado.

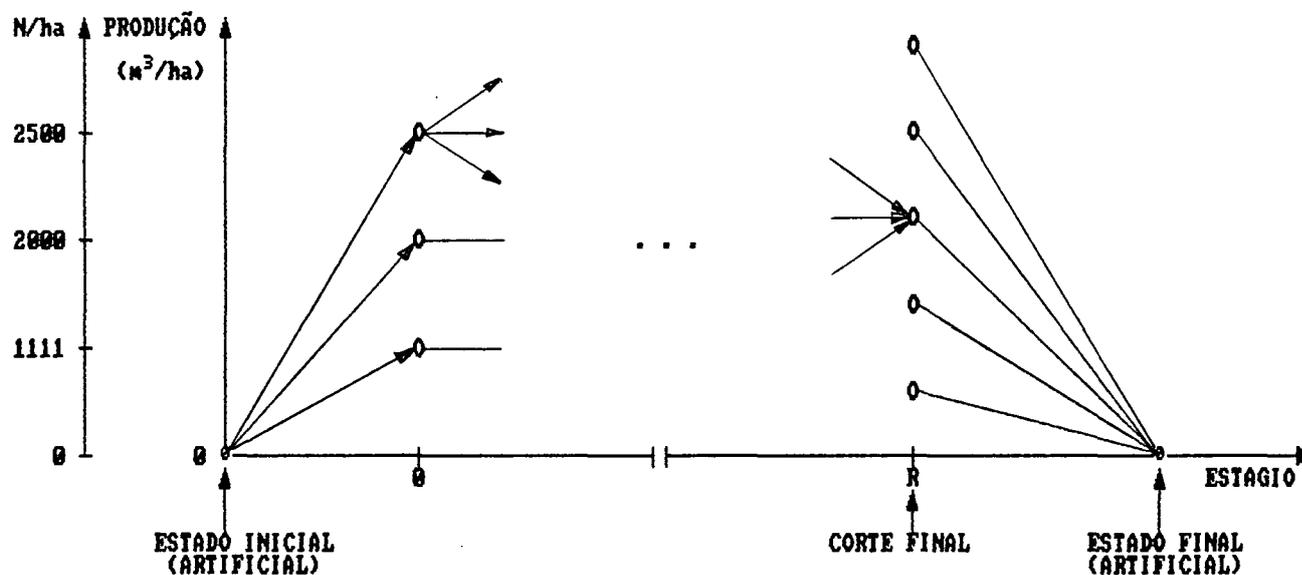


FIGURA 13. CONCEPÇÃO HIPOTÉTICA DE UMA ESTRUTURA DE REDES PARA UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO COM ESPAÇAMENTOS INICIAIS ALTERNATIVOS.

Objetivando caracterizar uma estrutura de redes com nós intermediários de decisão, e para os quais possam convergir os futuros estados do sistema, após a tomada de diferentes decisões no estágio anterior, convém estabelecer os estados em intervalos discretizados. A Figura 13 apresenta, na forma de um exemplo, a situação hipotética em que diferentes regimes "convergem" para uma mesma condição ou estado, por ocasião de um corte final, à idade de rotação. A "discretização de estados" pode ser efetivada aplicando-se algum procedimento de interpolação. Com este propósito, um exame das recomendações documentadas por LARSON & CASTI⁹² (p.144-8) pode ser particularmente útil.

6.6.1.4. A integração entre um modelo de crescimento e de produção e um modelo de otimização:

Este estudo contemplou o exame de regimes silviculturais previamente definidos, e, destes, a identificação do "melhor". Ou seja, os regimes foram definidos "a priori".

Apesar do fato de que Programação Dinâmica efetivamente possibilita a determinação de uma solução "ótima", o procedimento computacional desta técnica pode se mostrar também vantajoso para a definição de um regime silvicultural ótimo "a posteriori", ou seja: quando não se dispõe de uma especificação prévia dos regimes silviculturais alternativos. Neste caso, a integração entre um Simulador de Crescimento e de Produção e um Modelo de Otimização poderá acrescentar muitos benefícios.

Como é fácil verificar, o procedimento de análise de um problema de decisões sobre desbastes e corte raso pode ser totalmente automatizado. Dispondo-se de um programa gerenciador de módulos ou sub-programas componentes, um possível sistema automatizado de otimização poderia ter a seguinte estrutura:

- a) um programa inicial para a entrada das prescrições de desbaste, idade(s) de rotação, preços de madeira assim como dos custos de produção;
- b) um Sistema Integrado de Predição do Crescimento e da Produção, para a obtenção das estimativas de produção de madeira em cada operação de desbaste ou de corte raso;
- c) um módulo para o tratamento daquelas informações básicas, produzindo os dados acêrca do endereçamento dos "estados", das decisões e do valor para os retornos monetários associados a cada decisão;
- d) um sub-programa para a geração automática da rede analógica que representa o problema de decisões sequenciadas e interrelacionadas;

- e) um módulo que incorpora o modelo de otimização propriamente dito; e,
- f) um sub-programa que reporta os resultados da análise para o usuário.

Desta forma, dispondo-se de uma rede de estados, organizados de maneira sequenciada em estágios, Programação Dinâmica pode ser utilizada como um instrumento de busca ou triagem da melhor política de decisões a ser percorrida entre o plantio das mudas e o corte final do povoamento. Ou seja, ao invés de "selecionar" o regime silvicultural ótimo (dentre um conjunto de regimes alternativos previamente fornecidos), este seria "construído" pelo modelo, identificando o sequenciamento de decisões que propiciam, em seu conjunto, a solução ótima global.

Desta maneira, segundo o raciocínio exposto, o tratamento do problema poderia ser interpretado como a aplicação de uma lógica computacional em que o modelo é capaz de gerar o seu próprio desenvolvimento ou progresso durante um determinado horizonte de planejamento. Como examinado anteriormente, quando se utiliza um algoritmo de Programação Dinâmica, a essência deste processo de "deslocamento através de uma rede" ocorre devido à aplicação de uma "Equação de Transição de Estados".

Adicionalmente, há que se considerar o fato de que a qualidade da solução obtida com qualquer modelo de otimização está diretamente comprometida com a qualidade dos dados utilizados no seu processamento. Desta forma, é oportuno enfatizar a dependência direta que existe entre a solução ótima e as estimativas de produção de madeira.

Ou seja, uma vez implementada, uma decisão em silvicultura, como por exemplo a realização de um desbaste, irá desencadear um processo único e irreversível de crescimento, e, que, por sua vez, deverá produzir consequências sobre a produção de madeira durante muitos anos. Por este motivo, mas também devido à sua efetiva influência no processo de tomada de decisões, será sempre desejável prognosticar a magnitude absoluta destes níveis de futura produção. Desta forma, a disponibilidade destas estimativas é fundamental para a formulação de planos de manejo, a qualquer nível, quer seja estratégico, tático ou operacional.

6.6.2. Programação Dinâmica Estocástica:

De acordo com DREYFUS & LAW⁴⁷ (p.119) o principal atrativo que se encontra em Programação Dinâmica é "(....) a facilidade com que a técnica pode ser adaptada, tanto em termos matemáticos como computacionais, a situações estocásticas". Um processo de decisão em múltiplos estágios é dito "estocástico" se o resultado relacionado com pelo menos uma das decisões parciais do processo for aleatório BRONSON²⁴ (p.229). Desta forma, quando se conhece as distribuições de probabilidade às quais os eventos aleatórios estão subordinados, e se o número de estágios é finito, pode-se então conceber a estrutura de um problema de Programação Dinâmica Estocástica. O procedimento será o de otimizar o valor esperado do resultado.

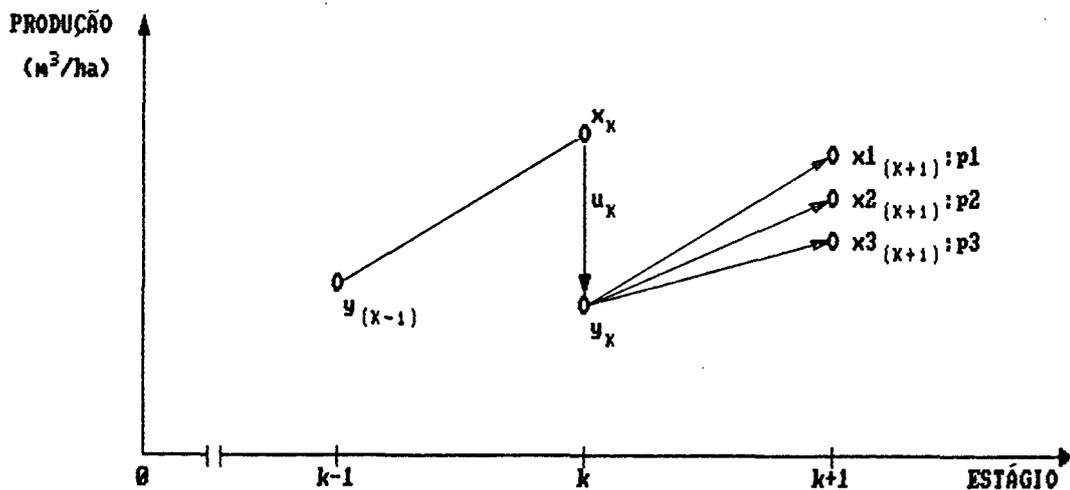
Certamente podem existir muitas dificuldades na implementação de uma política ótima de desbastes. Um povoamento

florestal é um sistema biológico extremamente complexo e que sofre modificações ao longo de sua vida, mesmo que nenhuma intervenção seja realizada por ações externas a este sistema de produção de madeira. Adicionalmente, cada árvore dentro de um povoamento florestal, é um ser vivo sujeito às leis biológicas do crescimento, assim como à variabilidade natural. Por este motivo, as estimativas de produção de madeira, obtidas com os Simuladores de Crescimento e de Produção, tanto para árvores individuais como para povoamentos florestais, são, na verdade, estimativas associadas a valores médios (por esta razão, em Biometria Florestal, é fundamental o cálculo de níveis de erro e intervalos de confiança).

De forma análoga, as estimativas dos custos de realização dos desbastes, assim como os preços para a madeira, em idades futuras, são valores aproximados, e que, eventualmente, poderão não ser verificados, na prática, de maneira determinística.

Nestas circunstâncias, e desde que níveis de probabilidade possam ser associados à ocorrência daqueles valores monetários de custos ou de receitas, ou às estimativas de produção de madeira, pode-se sugerir o desenvolvimento de um Modelo de Programação Dinâmica Estocástica. Conforme reportado por DAELLENBACH et al.⁴² (p.394), entretanto, ao contrário de "uma" solução ótima para um problema com estrutura determinística, o resultado da análise para um problema de Programação Dinâmica Estocástica será uma "Estratégia de Decisões Condicionadas".

A Figura 14 ilustra uma concepção da natureza do problema de decisões de desbaste quando o elemento probabilístico é incorporado às possíveis condições futuras de um povoamento florestal após a realização de um determinado desbaste.



p_1, p_2 , e p_3 indicam as probabilidades, no estágio $k+1$, com que o povoamento florestal pode ser descrito por x_1 , x_2 e x_3 , respectivamente.

FIGURA 14. REPRESENTAÇÃO HIPOTÉTICA DE UMA DECISÃO DE DESBASTE SEGUNDO UM PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA ESTOCÁSTICA.

É pertinente ressaltar que problemas em Programação Dinâmica Estocástica somente podem ser resolvidos pela formulação "backward". Esta limitação do método decorre da própria sequência cronológica dos eventos interdependentes, ou seja: uma decisão em determinado estado, no próximo estágio, somente pode ser tomada após o sistema efetivamente se encontrar naquela condição, em

consequência ao resultado que possa ser verificado depois que uma decisão tenha sido tomada no estado presente. O problema não seria "estocástico" se o resultado de uma decisão, supostamente aleatório, fosse conhecido com certeza, por antecipação, como ocorre no caso determinístico.

Qualquer esforço de desenvolvimento de um modelo de Programação Dinâmica Estocástica deverá considerar as importantes contribuições de LEMBERSKY & JOHNSON⁸³, LEMBERSKY⁸⁴, HOOL^{79,80}, KAO⁸⁵ e TEETER & CAULFIELD¹⁴². Apesar das dificuldades que certamente existem na obtenção de registros históricos sobre a produção de madeira assim como o comportamento dos seus preços, imprescindíveis para o conhecimento das distribuições de probabilidade, o desenvolvimento e a utilização destes modelos estocásticos contribui para tornar uma análise muito mais realista.

6.6.3. Método do Caminho Mínimo:

Segundo DYKSTRA⁵² (p.190), a expressão "Modelo de Rede", em Programação Matemática, é uma denominação genérica frequentemente usada para identificar um amplo conjunto de problemas de otimização que tratam da "Geometria das Posições" (saliente-se que estas "posições" podem ser físicas ou temporais).

Na "Teoria das Redes" (WAGNER¹⁴⁷, p.181; BRONSON²⁴, p.178-80; DAELLENBACH et al.⁴², p.186) ou "Teoria dos Grafos" (HILLER & LIEBERMAN⁷⁶, p.232), uma "rede" consiste de uma série de "nós" (ou junções) que estão conectados através de "arcos" (também

denominados ligações, arestas, ramos ou atividades). DYKSTRA⁵² (p.191) ainda acrescenta que uma "Rede" é um gráfico para o qual existe alguma medida quantitativa associada aos arcos.

O Modelo Analógico concebido como parte do desenvolvimento do presente estudo é uma "Rede Direcionada", um tipo especial de rede que apresenta características muito peculiares. A denominação específica deste tipo de rede deve-se à constatação de que, dentre todos os nós factíveis que foram estabelecidos, foi possível identificar um "nó origem" e um "nó destino", de tal maneira que todos os arcos obedeceram a um determinado sentido de orientação ou de direcção.

Aquela representação analógica do problema objeto deste estudo (i.e. uma Rede Direcionada) sugere a possibilidade para tratamento da questão através do "Método do Caminho Mínimo". A denominação desta técnica deve-se justamente ao propósito implícito ao método que é o de identificar o caminho (ou estratégia de decisões) que minimize o valor acumulado de algum critério quantitativo associado aos arcos de uma rede que apresente a mencionada estrutura. Como enfatizado, este método presta-se, portanto, para problemas de minimização. No caso da otimização simultânea das decisões sobre desbastes e idade de rotação, com produção de receitas, no entanto, pode-se considerar o uso de um artifício de análise quantitativa: a minimização do somatório dos retornos monetários associados aos arcos, mas, no entanto, como se aqueles retornos fossem valores negativos.

Não é propósito deste estudo aprofundar a discussão acerca do uso deste método na solução do problema examinado, mas tão somente sugerir que a sua aplicabilidade seja verificada em esforços subsequentes de pesquisa na área. Certamente, os trabalhos documentados por PAREDES-VELOSO & BRODIE^{112,113} e por CARNIERI²⁹ devem ser examinados na forma de contribuições introdutórias, mas de extremo valor, nesta área de conhecimentos.

7. CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES.

* O uso de Programação Dinâmica permitiu que fosse solucionado o problema de otimização simultânea das decisões sobre desbastes e rotação, conforme a proposta deste estudo. Dentre os 44 regimes considerados na análise, a "solução ótima" é o regime 37 (VET=US\$270,46) e que incorpora a prescrição de desbastes e de rotação descrita na Figura 4.

* Obviamente, esta solução ótima é a melhor mas apenas dentre as alternativas consideradas na análise. Outro regime silvicultural ótimo poderia existir, mas que não estivesse incluído no conjunto de regimes considerados neste estudo. A este respeito, uma discretização mais refinada do horizonte de planejamento, em intervalos, ou estágios, anuais, poderia produzir modificações substanciais nos resultados obtidos.

* A estrutura do modelo segundo uma relação de recorrência "backward" foi adequada para a determinação de uma política ótima de decisões, mesmo quando se considera o fato de que o estudo tratou de um problema com idades alternativas para rotação.

* O algoritmo desenvolvido, segundo a formulação backward, pode ser utilizado para outros problemas de mesma natureza e estrutura, mas, no entanto, com qualquer número de estágios e estados, ou seja: o algoritmo é de uso generalizado e aplicável,

portanto, para solucionar problemas de otimização das decisões de desbaste e de corte raso com qualquer espécie e com qualquer número de regimes silviculturais. Estes últimos podem conter qualquer prescrição de desbaste, em termos de idade(s), método(s) e intensidade(s), assim como qualquer idade de rotação. Desde que seja utilizada a mesma estrutura desenvolvida para este estudo, o modelo sempre irá determinar a solução ótima.

* O caráter determinístico da equação de recorrência, e, portanto, dos dados assim como da solução ótima encontrada, pode ser questionado quando se considera a natureza probabilística tanto das estimativas de produção presente e futura de madeira, como das informações relativas aos custos de produção e dos preços associados às diferentes classes de matéria-prima produzida. Por este motivo, portanto, recomenda-se a realização de pesquisas no desenvolvimento de um modelo de otimização que incorpore um modelo de Programação Dinâmica Estocástica.

* A integração de um Sistema Integrado de Predição do Crescimento e da Produção com um Modelo de Otimização, como este desenvolvido neste estudo, certamente trará maior flexibilidade e eficiência para um usuário.

* Recomenda-se que variações do problema examinado sejam também objeto de investigação futura, estabelecendo-se os seguintes objetivos alternativos em cada caso:

- a) máxima produção física de madeira, tanto com uma rotação fixa como com rotações variáveis;
- b) otimização com a possibilidade de se adotar densidades iniciais alternativas (N/ha) por ocasião do plantio;
- c) formulação do problema segundo o procedimento "forward";
e,
- d) discretização do horizonte de planejamento em intervalos anuais;

* As soluções obtidas com o Modelo de Programação Dinâmica e através do enfoque de Enumeração Total foram idênticas. Para um problema de pequenas dimensões como este, examinado na forma de um "Estudo de Caso", seria viável a solução através de Enumeração Total. Quando um elevado número de regimes silviculturais for considerado, entretanto, Programação Dinâmica será mais eficiente, pelas seguintes razões:

a) a determinação da solução ótima global é mais rápida, uma vez que não há necessidade de determinar o valor de VET para todos os regimes. Através de Programação Dinâmica o modelo examina o problema sequencialmente, por etapas, acumulando o retorno monetário de cada decisão parcial, e totalizando o VET somente para a política ótima de decisões (i.e., para o regime silvicultural ótimo); e,

b) pode-se determinar a política parcial ótima até o corte final a partir de qualquer idade intermediária entre o plantio das mudas e a idade de rotação.

* Sempre que os regimes silviculturais forem mutuamente exclusivos e independentes, a Enumeração Total (ou Inspeção Total) é o procedimento de otimização mais adequado. Para justificar o uso de Programação Dinâmica torna-se necessário que exista uma "história de silvicultura" comum, a partir do plantio até algum momento intermediário no transcorrer dos regimes silviculturais. Quando aquela "história comum" puder ser identificada, existirão "nós de decisão" e "arcos" intermediários ao longo do horizonte de planejamento. Uma concepção geométrica desta condição desejável para o uso de Programação Dinâmica pressupõe uma estrutura de rede (como em árvores de decisão) para o problema.

* Uma vez que o algoritmo de otimização desenvolvido é matematicamente correto, e que os regimes silviculturais foram pré-estabelecidos, a qualidade e a precisão da solução ótima está em direta dependência com a qualidade dos dados. Assumindo-se que tanto os preços para a madeira como os custos de produção sejam também conhecidos, resta então indagar sobre as estimativas de produção presente e futura de madeira, por sortimento. Quanto a este componente de informação convém enfatizar a importância de se dispor de um eficiente e adequado Sistema Integrado de Predição do Crescimento e da Produção. Neste estudo, fêz-se uso do simulador SisPinus na condição de um instrumento de trabalho, mas sem qualquer questionamento acerca da sua aplicabilidade para gerar as estimativas de produção segundo as características dos

regimes silviculturais incluídos na análise. Ou seja, em função da experiência adquirida com o uso deste simulador entendeu-se que as estimativas geradas são satisfatórias para os propósitos deste estudo. Este pode não ser necessariamente o caso em um outro trabalho de pesquisa sobre o tema.

* Finalmente, convém enfatizar a grande utilidade do Modelo de Otimização desenvolvido como uma ferramenta de suporte para o processo de tomada de decisões na silvicultura de plantações de espécies de *Pinus* no Brasil. Desta forma, o modelo desenvolvido neste estudo pode ser utilizado como um poderoso e eficiente instrumento para orientar a formulação de políticas de incentivo ao reflorestamento, em especial quando se objetiva maximizar o retorno econômico desta atividade produtiva.

ABSTRACT

This document describes the development of an optimization model for the simultaneous determination of the optimal thinning regime and economic rotation age for loblolly pine stands. As a case study, this research has examined the problem using information on site class, production costs and stumpage provided by "Papel de Imprensa S.A.", a Pulp & Paper industry established in the locality of Jaguariaíva, PR, Brasil. Yield estimates were obtained through the use of an improved version of an Integrated System for Growth and Yield Prediction available at the National Center of Forestry Research (EMBRAPA - CNPFlorestas). Forty-four alternative silvicultural regimes were examined in the analysis. These regimes were selected in order to cover an adequate range of silvicultural practices so that three different objectives could be accommodated: four regimes directed to biomass production, twenty regimes for the production of sawlogs and veneer bolts, and twenty regimes capable of producing multiple products. Three categories of products were considered: pulpwood, sawlogs and veneer bolts. In addition to production thinning, for some regimes, the analysis has also accounted for the possibility of pre-commercial thinning. A discrete-stage, discrete-state, deterministic Dynamic Programming model was developed in order to solve this decision problem organized as a network with 9 stages and up to 44 states. Soil Expectation Value (SEV) was used as the criterion for examining intermediate decisions. Two innovative aspects of the model developed are: a) the evaluation of silvicultural regimes which are not only feasible in theory but, actually, also operational in the silviculture of this species, as currently practiced in Southern Brasil; and, b) the "backward" solution procedure was used for a problem with varying rotation ages: this comes against some generalizations found in the literature about possible inadequacies and/or limitations of that approach in favor of the "forward" formulation for this class of decision problems. In addition to the development of an optimization model for general use, the study was also conceived in order to examine the applicability of Dynamic Programming for the solution of this category of decision problem in both plantation silviculture and management. The performance of the model indicated that the Dynamic Programming formulation was able to characterize the nature of the financial problem as well as the relationship among the biological, mensurational and financial components. Results indicated that the Dynamic Programming model and the Total Enumeration approach, using a commercial spreadsheet package, provided the same solution. Recommendations for future research include the development of a stochastic DP model which could consider probabilities associated with timber yield estimates and wood prices, as well as the use of the shortest path method as a solution procedure.

ANEXOS

ANEXO 1. ESTIMATIVAS DE PRODUÇÃO DE MADEIRA (VOLUME COMERCIAL m³ sol. cc./ha), POR IDADE E POR CLASSE DE PRODUTO, SEGUNDO OS DIFERENTES REGIMES SILVICULTURAIS CONSIDERADOS NO ESTUDO.

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														TOTAL		
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30			
1	C *					213												300
	S					82												
	L					5												
	T					300												
2	C							234										348
	S							97										
	L							17										
	T							348										
3	C								249									385
	S								104									
	L								32									
	T								385									
4	C									260								413
	S									107								
	L									46								
	T									413								

* C = Toras curtas e de pequeno diâmetro para Celulose.
 S = Toras para Serraria.
 L = Toras para Laminação.
 T = Volume Total de toras/ha.

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)															TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
5	C		0	41		30		23		19	72						
	S		0	1		8		17		3	11						
	L		0	0		1		6		14	59						
	T		0	42		39		46		36	142						
6	C		0	41		30		23		19		79					
	S		0	1		8		17		3		12					
	L		0	0		1		6		14		65					
	T		0	42		39		46		36		156					
7	C		0	41		30		23		19			75				
	S		0	1		8		17		3			12				
	L		0	0		1		6		14			64				
	T		0	42		39		46		36			151				
8	C		0	41		38		28		78							
	S		0	1		10		18		12							
	L		0	0		2		9		63							
	T		0	42		50		55		153							
9	C		0	41		38		28			87						
	S		0	1		10		18			13						
	L		0	0		2		9			72						
	T		0	42		50		55			172						
10	C		0	41		38		28				87					
	S		0	1		10		18				13					
	L		0	0		2		9				79					
	T		0	42		50		55				179					
11	C		0	41		38		28					88				
	S		0	1		10		18					14				
	L		0	0		2		9					90				
	T		0	42		50		55					192				

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
12	C		0		39		38		35		74					
	S		0		3		19		22		11					
	L		0		0		3		11		60					
	T		0		42		60		68		145					
13	C		0		39		38		35			85				
	S		0		3		19		22			12				
	L		0		0		3		11			71				
	T		0		42		60		68			168				
14	C		0		39		38		35				92			
	S		0		3		19		22				13			
	L		0		0		3		11				80			
	T		0		42		60		68				185			
15	C		0			54		39			90					
	S		0			11		29			14					
	L		0			1		9			76					
	T		0			66		77			180					
16	C		0			54		39				92				
	S		0			11		29				15				
	L		0			1		9				76				
	T		0			66		77				183				
17	C		0			54		39					94			
	S		0			11		29					15			
	L		0			1		9					93			
	T		0			66		77					202			
18	C		0			54		39						95		
	S		0			11		29						15		
	L		0			1		9						94		
	T		0			66		77						204		

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
19	C		0			54			39							91
	S		0			11			29							16
	L		0			1			9							110
	T		0			66			77							217
																360
20	C		0			54			44			81				
	S		0			11			30			13				
	L		0			1			13			66				
	T		0			66			87			160				
																313
21	C		0			54			44				93			
	S		0			11			30				13			
	L		0			1			13				81			
	T		0			66			87				187			
																340
22	C		0			54			44					96		
	S		0			11			30					14		
	L		0			1			13					88		
	T		0			66			87					198		
																351
23	C		0			54			44						97	
	S		0			11			30						15	
	L		0			1			13						100	
	T		0			66			87						212	
																365
24	C		0			54			44							95
	S		0			11			30							16
	L		0			1			13							108
	T		0			66			87							219
																372
25	C			36	42			31	15			16			107	
	S			3	11			7	13			11			16	
	L			0	0			1	2			4			88	
	T			39	53			39	30			31			211	
																403

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)															TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
26	C			36	42		31	15		16			120				
	S			3	11		7	13		11			17				
	L			0	0		1	2		4			100				
	T			39	53		39	30		31			237				429
27	C			36	42		31	15		16				129			
	S			3	11		7	13		11				18			
	L			0	0		1	2		4				111			
	T			39	53		39	30		31				258			450
28	C			36	42		31	15		16						134	
	S			3	11		7	13		11						25	
	L			0	0		1	2		4						116	
	T			39	53		39	30		31						275	467
29	C			41	27	33		24		102							
	S			2	3	7		19		27							
	L			0	0	0		4		70							
	T			43	30	40		47		199							359
30	C			41	27	33		24			115						
	S			2	3	7		19			25						
	L			0	0	0		4			85						
	T			43	30	40		47			225						385
31	C			41	27	33		24				127					
	S			2	3	7		19				24					
	L			0	0	0		4				98					
	T			43	30	40		47				249					409
32	C			41	27	33		24					131				
	S			2	3	7		19					19				
	L			0	0	0		4					111				
	T			43	30	40		47					261				421

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
33	C			41		49		42		92						
	S			2		9		33		24						
	L			0		0		8		64						
	T			43		58		83		180						364
34	C			41		49		42		104						
	S			2		9		33		22						
	L			0		0		8		78						
	T			43		58		83		204						388
35	C			41		49		42				111				
	S			2		9		33				16				
	L			0		0		8				92				
	T			43		58		83				219				403
36	C			41		49		42					121			
	S			2		9		33					17			
	L			0		0		8					105			
	T			43		58		83					243			427
37	C				66			96		97						
	S				14			34		44						
	L				0			15		50						
	T				80			145		191						416
38	C				66			96			110					
	S				14			34			42					
	L				0			15			64					
	T				80			145			216					441
39	C				66			96				119				
	S				14			34				40				
	L				0			15				75				
	T				80			145				234				459

(ANEXO 1. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														TOTAL
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
40	C				66			96					125			
	S				14			34					39			
	L				0			15					83			
	T				80			145					247			472
41	C				92			64			88					
	S				12			26			23					
	L				0			4			62					
	T				104			94			173					371
42	C				92			64				105				
	S				12			26				22				
	L				0			4				79				
	T				104			94				206				404
43	C				92			64					109			
	S				12			26					22			
	L				0			4					83			
	T				104			94					214			412
44	C				92			64					122			
	S				12			26					21			
	L				0			4					102			
	T				104			94					245			443

ANEXO 2. VALOR DO VOLUME COMERCIAL DA MADEIRA EM PÉ (US\$/ha) POR IDADE E CLASSE DE PRODUTO, PARA CADA UM DOS REGIMES SILVICULTURAIS ANALISADOS.

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
1	C *					532,50										
	S					492,00										
	L					60,00										
	T					1.084,50										
2	C						585,00									
	S						582,00									
	L						204,00									
	T						1.371,00									
3	C							622,50								
	S							624,00								
	L							384,00								
	T							1.630,50								
4	C								650,00							
	S								642,00							
	L								552,00							
	T								1.844,00							

* C = Toras curtas e de pequeno diâmetro para Celulose.

S = Toras para Serraria.

L = Toras para Laminação.

T = Volume Total de toras/ha.

(ANEXO 2. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)													
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	C			102,50		75,00		57,50		47,50	180,00				
	S			6,00		48,00		102,00		18,00	66,00				
	L			0,00		12,00		72,00		168,00	708,00				
	T			108,50		135,00		231,50		233,50	954,00				
6	C			102,50		75,00		57,50		47,50		197,50			
	S			6,00		48,00		102,00		18,00		72,00			
	L			0,00		12,00		72,00		168,00		780,00			
	T			108,50		135,00		231,50		233,50		1.049,50			
7	C			102,50		75,00		57,50		47,50			187,50		
	S			6,00		48,00		102,00		18,00			72,00		
	L			0,00		12,00		72,00		168,00			768,00		
	T			108,50		135,00		231,50		233,50			1.027,50		
8	C			102,50		95,00		70,00		195,00					
	S			6,00		60,00		108,00		72,00					
	L			0,00		24,00		108,00		756,00					
	T			108,50		179,00		286,00		1.023,00					
9	C			102,50		95,00		70,00			217,50				
	S			6,00		60,00		108,00			78,00				
	L			0,00		24,00		108,00			864,00				
	T			108,50		179,00		286,00			1.159,50				
10	C			102,50		95,00		70,00				217,50			
	S			6,00		60,00		108,00				78,00			
	L			0,00		24,00		108,00				948,00			
	T			108,50		179,00		286,00				1.243,50			
11	C			102,50		95,00		70,00					220,00		
	S			6,00		60,00		108,00					84,00		
	L			0,00		24,00		108,00					1.080,00		
	T			108,50		179,00		286,00					1.384,00		

(ANEXO 2. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)													
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
12	C				97,50		95,00		87,50		185,00				
	S				18,00		114,00		132,00		66,00				
	L				0,00		36,00		132,00		720,00				
	T				115,50		245,00		351,50		971,00				
13	C				97,50		95,00		87,50			212,50			
	S				18,00		114,00		132,00			72,00			
	L				0,00		36,00		132,00			852,00			
	T				115,50		245,00		351,50			1.136,50			
14	C				97,50		95,00		87,50				230,00		
	S				18,00		114,00		132,00				78,00		
	L				0,00		36,00		132,00				960,00		
	T				115,50		245,00		351,50				1.268,00		
15	C					135,00		97,50			225,00				
	S					66,00		174,00			84,00				
	L					12,00		108,00			912,00				
	T					213,00		379,50			1.221,00				
16	C					135,00		97,50				230,00			
	S					66,00		174,00				90,00			
	L					12,00		108,00				912,00			
	T					213,00		379,50				1.232,00			
17	C					135,00		97,50					235,00		
	S					66,00		174,00					90,00		
	L					12,00		108,00					1.116,00		
	T					213,00		379,50					1.441,00		
18	C					135,00		97,50						237,50	
	S					66,00		174,00						90,00	
	L					12,00		108,00						1.128,00	
	T					213,00		379,50						1.455,50	

(ANEXO 2. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)													
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
19	C					135,00		97,50							227,50
	S					66,00		174,00							96,00
	L					12,00		108,00							1.320,00
	T					213,00		379,50							1.643,50
20	C					135,00			110,00		202,50				
	S					66,00			180,00		78,00				
	L					12,00			156,00		792,00				
	T					213,00			446,00		1.072,50				
21	C					135,00			110,00			232,50			
	S					66,00			180,00			78,00			
	L					12,00			156,00			972,00			
	T					213,00			446,00			1.282,50			
22	C					135,00			110,00				240,00		
	S					66,00			180,00				84,00		
	L					12,00			156,00				1.056,00		
	T					213,00			446,00				1.380,00		
23	C					135,00			110,00					242,50	
	S					66,00			180,00					90,00	
	L					12,00			156,00					1.200,00	
	T					213,00			446,00					1.532,50	
24	C					135,00			110,00						237,50
	S					66,00			180,00						96,00
	L					12,00			156,00						1.296,00
	T					213,00			446,00						1.629,50
25	C			90,00	105,00		77,50	37,50		40,00		267,50			
	S			18,00	66,00		42,00	78,00		66,00		96,00			
	L			0,00	0,00		12,00	24,00		48,00		1.056,00			
	T			108,00	171,00		131,50	139,50		154,00		1.419,50			

(ANEXO 2. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
26	C			90,00	105,00		77,50	37,50		40,00			300,00			
	S			18,00	66,00		42,00	78,00		66,00			102,00			
	L			0,00	0,00		12,00	24,00		48,00			1.200,00			
	T			108,00	171,00		131,50	139,50		154,00			1.602,00			
27	C			90,00	105,00		77,50	37,50		40,00				322,50		
	S			18,00	66,00		42,00	78,00		66,00				108,00		
	L			0,00	0,00		12,00	24,00		48,00				1.332,00		
	T			108,00	171,00		131,50	139,50		154,00				1.762,50		
28	C			90,00	105,00		77,50	37,50		40,00					335,00	
	S			18,00	66,00		42,00	78,00		66,00					150,00	
	L			0,00	0,00		12,00	24,00		48,00					1.392,00	
	T			108,00	171,00		131,50	139,50		154,00					1.877,00	
29	C			102,50	67,50	82,50		60,00		255,00						
	S			12,00	18,00	42,00		114,00		162,00						
	L			0,00	0,00	0,00		48,00		840,00						
	T			114,50	85,50	124,50		222,00		1.257,00						
30	C			102,50	67,50	82,50		60,00			287,50					
	S			12,00	18,00	42,00		114,00			150,00					
	L			0,00	0,00	0,00		48,00			1.020,00					
	T			114,50	85,50	124,50		222,00			1.457,50					
31	C			102,50	67,50	82,50		60,00				317,50				
	S			12,00	18,00	42,00		114,00				144,00				
	L			0,00	0,00	0,00		48,00				1.176,00				
	T			114,50	85,50	124,50		222,00				1.637,50				
32	C			102,50	67,50	82,50		60,00					327,50			
	S			12,00	18,00	42,00		114,00					114,00			
	L			0,00	0,00	0,00		48,00					1.332,00			
	T			114,50	85,50	124,50		222,00					1.773,50			

(ANEXO 2. continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)													
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
33	C			102,50		122,50		105,00		230,00					
	S			12,00		54,00		198,00		144,00					
	L			0,00		0,00		96,00		768,00					
	T			114,50		176,50		399,00		1.142,00					
34	C			102,50		122,50		105,00		260,00					
	S			12,00		54,00		198,00		132,00					
	L			0,00		0,00		96,00		936,00					
	T			114,50		176,50		399,00		1.328,00					
35	C			102,50		122,50		105,00				277,50			
	S			12,00		54,00		198,00				96,00			
	L			0,00		0,00		96,00				1.104,00			
	T			114,50		176,50		399,00				1.477,50			
36	C			102,50		122,50		105,00					302,50		
	S			12,00		54,00		198,00					102,00		
	L			0,00		0,00		96,00					1.260,00		
	T			114,50		176,50		399,00					1.664,50		
37	C				165,00			240,00			242,50				
	S				84,00			204,00			264,00				
	L				0,00			180,00			600,00				
	T				249,00			624,00			1.106,50				
38	C				165,00			240,00			275,00				
	S				84,00			204,00			252,00				
	L				0,00			180,00			768,00				
	T				249,00			624,00			1.295,00				
39	C				165,00			240,00				297,50			
	S				84,00			204,00				240,00			
	L				0,00			180,00				900,00			
	T				249,00			624,00				1.437,50			

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)																
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30			
40	C				165,00				240,00								312,50	
	S				84,00			204,00									234,00	
	L				0,00			180,00									98,00	
	T				249,00			624,00									1.542,50	
41	C				230,00			160,00								220,00		
	S				72,00			156,00								138,00		
	L				0,00			48,00								744,00		
	T				302,00			364,00								1.102,00		
42	C				230,00			160,00								262,50		
	S				72,00			156,00								132,00		
	L				0,00			48,00								948,00		
	T				302,00			364,00								1.342,50		
43	C				230,00			160,00								272,50		
	S				72,00			156,00								132,00		
	L				0,00			48,00								996,00		
	T				302,00			364,00								1.400,50		
44	C				230,00			160,00									305,00	
	S				72,00			156,00									126,00	
	L				0,00			48,00									1.224,00	
	T				302,00			364,00									1.655,00	

ANEXO 3. VALOR ESPERADO DA TERRA (VET, US\$/ha), ASSOCIADO À OCORRÊNCIA DE CUSTOS E DE RECEITAS PARCIAIS EM CADA UM DOS REGIMES SILVICULTURAIS ANALISADOS.

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
1	T	-957,89				1071,43										
	FD1	11,9879504	11,5746429	11,2472647	11,1100611	10,9879504	10,8792724	10,7825493	10,6964661	10,6198523	10,5516663	10,4909811	10,4369714	10,3889030	10,3461223	
2	T	-896,66					1087,32									
	FD1	11,7930818	11,4202887	11,1250017	11,0012475	10,8911067	10,7930818	10,7058399	10,6281950	10,5590913	10,4975893	10,4428527	10,3941373	10,3507808	10,3121937	
3	T	-851,46						1058,52								
	FD1	11,6492023	11,3063227	11,0347299	10,9209060	10,8196030	10,7294438	10,6492023	10,5777878	10,5142291	10,4576620	10,4073176	10,3625112	10,3226337	10,2871428	
4	T	-816,93							994,42							
	FD1	11,5392756	11,2192505	10,9657606	10,8595234	10,7649728	10,6808231	10,6059301	10,5392756	10,4799534	10,4271568	10,3801680	10,3383482	10,3011287	10,2680034	
5	T	-768,17	-43,85	94,22		92,86		126,13		100,77	366,42					
	FD1	11,3840928	11,0963311	10,8683969	10,7728701	10,6878517	10,6121855	10,5448429	10,4849083	10,4315666	10,3840928	10,3418412	10,3042374	10,2707702	10,2409845	

* T refere-se ao Valor Total/ha correspondente ao custo ou à receita incorridos em um determinado Regime Silvicultural.
FD1 indica o valor para o Fator de Desconto calculado conforme o procedimento descrito no item 5.3.6.

ANEXO 3. (continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
6	T	-750,54	-42,08	90,40		89,10		121,02		96,69		344,22				
	FD1	1,3279834	1,0518872	0,8331932	0,7415390	0,6599670	0,5873683	0,5227557	0,4652507	0,4140715	0,3685221	0,3279834	0,2919040	0,2597935	0,2312153	
7	T	-736,02	-40,61	87,25		85,99		116,80		93,32		289,49				
	FD1	1,2817391	1,0152574	0,8041789	0,7157164	0,6369850	0,5669144	0,5045518	0,4490493	0,3996523	0,3556891	0,3165620	0,2817391	0,2507468	0,2231637	
8	T	-789,84	-46,04	98,92		129,26		163,59		463,50						
	FD1	1,4530759	1,1509722	0,9116778	0,8113900	0,7221342	0,6426968	0,5719979	0,5090761	0,4530759	0,4032359	0,3588785	0,3194006	0,2842654	0,2529952	
9	T	-768,17	-43,85	94,22		123,13		155,83		445,36						
	FD1	1,3840928	1,0963311	0,8683969	0,7728701	0,6878517	0,6121855	0,5448429	0,4849083	0,4315666	0,3840928	0,3418412	0,3042374	0,2707702	0,2409845	
10	T	-750,54	-42,08	90,40		118,13		149,51				407,85				
	FD1	1,3279834	1,0518872	0,8331932	0,7415390	0,6599670	0,5873683	0,5227557	0,4652507	0,4140715	0,3685221	0,3279834	0,2919040	0,2597935	0,2312153	
11	T	-736,02	-40,61	87,25		114,02		144,30				389,93				
	FD1	1,2817391	1,0152574	0,8041789	0,7157164	0,6369850	0,5669144	0,5045518	0,4490493	0,3996523	0,3556891	0,3165620	0,2817391	0,2507468	0,2231637	
12	T	-768,17	-54,82		89,27		149,99		170,45		372,95					
	FD1	1,3840928	1,0963311	0,8683969	0,7728701	0,6878517	0,6121855	0,5448429	0,4849083	0,4315666	0,3840928	0,3418412	0,3042374	0,2707702	0,2409845	
13	T	-750,54	-52,59		85,65		143,91		163,54		372,75					
	FD1	1,3279834	1,0518872	0,8331932	0,7415390	0,6599670	0,5873683	0,5227557	0,4652507	0,4140715	0,3685221	0,3279834	0,2919040	0,2597935	0,2312153	

ANEXO 3. (continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
14	T	-736,02	-50,76		82,67		138,89		157,84				357,25			
	FD1	1,2817391	1,0152574	1,8041789	1,7157164	1,6369850	1,5669144	1,5045518	1,4490493	1,3996523	1,3556891	1,3165620	1,2817391	1,2507468	1,2231637	
15	T	-768,17	-65,78			146,51		206,77			468,98					
	FD1	1,3840928	1,0963311	1,8683969	1,7728701	1,6878517	1,6121855	1,5448429	1,4849003	1,4315666	1,3840928	1,3418412	1,3042374	1,2707702	1,2409845	
16	T	-750,54	-63,11			140,57		198,39				404,08				
	FD1	1,3279834	1,0518872	1,8331932	1,7415390	1,6599670	1,5873683	1,5227557	1,4652507	1,4140715	1,3685221	1,3279834	1,2919040	1,2597935	1,2312153	
17	T	-736,02	-60,92			135,68		191,48					405,99			
	FD1	1,2817391	1,0152574	1,8041789	1,7157164	1,6369850	1,5669144	1,5045518	1,4490493	1,3996523	1,3556891	1,3165620	1,2817391	1,2507468	1,2231637	
18	T	-723,91	-59,08			131,60		185,72						353,99		
	FD1	1,2432091	1,09847381	1,7800048	1,6942015	1,6178368	1,5498726	1,4893846	1,4355506	1,3876385	1,3449968	1,3070460	1,2732698	1,2432091	1,2164553	
19	T	-713,73	-57,54			128,17		180,88						346,47		
	FD1	1,2108151	1,09590790	1,7596804	1,6761128	1,6017380	1,5355447	1,4766329	1,4242015	1,3775379	1,3360073	1,2990453	1,2661493	1,2368719	1,2108151	
20	T	-768,17	-65,78			146,51			216,27		411,94					
	FD1	1,3840928	1,0963311	1,8683969	1,7728701	1,6878517	1,6121855	1,5448429	1,4849003	1,4315666	1,3840928	1,3418412	1,3042374	1,2707702	1,2409845	
21	T	-750,54	-63,11			140,57			207,50			420,64				
	FD1	1,3279834	1,0518872	1,8331932	1,7415390	1,6599670	1,5873683	1,5227557	1,4652507	1,4140715	1,3685221	1,3279834	1,2919040	1,2597935	1,2312153	

ANEXO 3. (continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)													
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
22	T	-736,02	-60,92			135,68				200,28				388,80	
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,80041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637
23	T	-723,91	-59,08			131,60				194,26					372,72
	FD1	11,2432091	10,9847381	10,7800048	10,6942015	10,6178368	10,5498726	10,4893846	10,4355506	10,3876385	10,3449968	10,3070460	10,2732698	10,2432091	10,2164553
24	T	-713,73	-57,54			128,17				189,19					343,52
	FD1	11,2108151	10,9590790	10,7596804	10,6761128	10,6017380	10,5355447	10,4766329	10,4242015	10,3775379	10,3360073	10,2990453	10,2661493	10,2368719	10,2108151
25	T	-750,54		89,98	126,80			77,24	72,92			63,77		465,57	
	FD1	11,3279834	11,0510872	10,8331932	10,7415390	10,6599670	10,5873683	10,5227557	10,4652507	10,4140715	10,3685221	10,3279834	10,2919040	10,2597935	10,2312153
26	T	-736,02		86,85	122,39			74,55	70,38			61,55		451,35	
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,80041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637
27	T	-723,91		84,24	118,71			72,31	68,27			59,70			428,66
	FD1	11,2432091	10,9847381	10,7800048	10,6942015	10,6178368	10,5498726	10,4893846	10,4355506	10,3876385	10,3449968	10,3070460	10,2732698	10,2432091	10,2164553
28	T	-713,73		82,05	115,62			70,42	66,49			58,14			395,70
	FD1	11,2108151	10,9590790	10,7596804	10,6761128	10,6017380	10,5355447	10,4766329	10,4242015	10,3775379	10,3360073	10,2990453	10,2661493	10,2368719	10,2108151
29	T	-789,84		104,39	69,37	89,91			126,98			569,52			
	FD1	11,4530759	11,1509722	10,9116778	10,8113900	10,7221342	10,6426968	10,5719979	10,5090761	10,4530759	10,4032359	10,3588785	10,3194006	10,2842654	10,2529952

ANEXO 3. (continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
30	T	-768,17		99,43	66,08	85,64		120,96		0	559,82					
	FD1	11,3840928	11,0963311	10,8683969	10,7728701	10,6878517	10,6121855	10,5448429	10,4849083	10,4315666	10,3840928	10,3418412	10,3042374	10,2707702	10,2409845	
31	T	-750,54		95,40	63,40	82,17		116,05				537,07				
	FD1	11,3279834	11,0518872	10,8331932	10,7415390	10,6599670	10,5873683	10,5227557	10,4652507	10,4140715	10,3685221	10,3279834	10,2919040	10,2597935	10,2312153	
32	T	-736,02		92,08	61,19	79,30		112,01					499,66			
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,8041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637	
33	T	-789,84		104,39		127,46		228,23		517,41						
	FD1	11,4530759	11,1509722	10,9116778	10,8113900	10,7221342	10,6426968	10,5719979	10,5090761	10,4530759	10,4032359	10,3588785	10,3194006	10,2842654	10,2529952	
34	T	-768,17		99,43		121,41		217,39			510,08					
	FD1	11,3840928	11,0963311	10,8683969	10,7728701	10,6878517	10,6121855	10,5448429	10,4849083	10,4315666	10,3840928	10,3418412	10,3042374	10,2707702	10,2409845	
35	T	-750,54		95,40		116,48		208,58				484,60				
	FD1	11,3279834	11,0518872	10,8331932	10,7415390	10,6599670	10,5873683	10,5227557	10,4652507	10,4140715	10,3685221	10,3279834	10,2919040	10,2597935	10,2312153	
36	T	-736,02		92,08		112,43		201,32					468,95			
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,8041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637	
37	T	-789,84			202,04			356,93		501,33						
	FD1	11,4530759	11,1509722	10,9116778	10,8113900	10,7221342	10,6426968	10,5719979	10,5090761	10,4530759	10,4032359	10,3588785	10,3194006	10,2842654	10,2529952	

ANEXO 3. (continuação)

REGIME	PRODUTO	IDADE (anos)														
		0	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
38	T	-768,17			192,44			339,98			497,40					
	FD1	11,3840928	11,0963311	10,8683969	10,7728701	10,6878517	10,6121855	10,5448429	10,4849083	10,4315666	10,3840928	10,3418412	10,3042374	10,2707702	10,2409845	
39	T	-750,54			184,64			326,20			471,48					
	FD1	11,3279834	11,0518872	10,8331932	10,7415390	10,6599670	10,5873683	10,5227557	10,4652507	10,4140715	10,3685221	10,3279834	10,2919040	10,2597935	10,2312153	
40	T	-736,02			178,21			314,84			434,58					
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,8041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637	
41	T	-789,84			245,04			233,94			499,29					
	FD1	11,4530759	11,1509722	10,9116778	10,8113900	10,7221342	10,6426968	10,5719979	10,5090761	10,4530759	10,4032359	10,3588785	10,3194006	10,2842654	10,2529952	
42	T	-768,17			233,41			222,84			515,64					
	FD1	11,3840928	11,0963311	10,8683969	10,7728701	10,6878517	10,6121855	10,5448429	10,4849083	10,4315666	10,3840928	10,3418412	10,3042374	10,2707702	10,2409845	
43	T	-750,54			223,94			213,80			459,34					
	FD1	11,3279834	11,0518872	10,8331932	10,7415390	10,6599670	10,5873683	10,5227557	10,4652507	10,4140715	10,3685221	10,3279834	10,2919040	10,2597935	10,2312153	
44	T	-736,02			216,15			206,36			466,28					
	FD1	11,2817391	11,0152574	10,8041789	10,7157164	10,6369850	10,5669144	10,5045518	10,4490493	10,3996523	10,3556891	10,3165620	10,2817391	10,2507468	10,2231637	

8. GLOSSÁRIO.

Uma vez que o desenvolvimento deste estudo implicou em uma apreciação integrada e simultânea de diferentes disciplinas, elaborou-se uma lista dos termos técnicos considerados mais essenciais para uma correta interpretação do texto. Ao invés de se documentar uma "definição" para cada termo, optou-se por apresentar um "conceito" para cada qual, pretendendo-se desta forma facilitar a sua utilização nas circunstâncias e características específicas do problema objeto desta investigação. Os termos são apresentados, em ordem alfabética, como segue:

Agente da Decisão: o indivíduo (ou grupo de indivíduos), responsável(eis) pela seleção de uma estratégia ou solução-alternativa para um problema de decisão. O mesmo que "Tomador de Decisão".

Algoritmo: qualquer procedimento computacional recursivo ou mecânico (The Heritage Illustrated Dictionary of the English Language, 1975). Por exemplo, um conjunto finito de operações de matemática e de lógica, organizados segundo uma sequência definida e coerente.

Corte Raso: o corte de todas as árvores de um povoamento florestal, realizado ao término da rotação ou à idade de rotação (o mesmo que corte final).

Critério de Decisão: uma característica quantificável que pode ser avaliada para cada solução-alternativa, ou estratégia, e cujo valor expressa a superioridade relativa de cada qual em relação às demais. (um dos componentes essenciais do processo de decisão).

Desbaste: qualquer corte parcial de árvores realizado durante a vida de um povoamento florestal.

Dissetâneo: diz-se do povoamento florestal formado por árvores com mais que uma única idade. Este tipo de povoamento é, por vezes, também denominado "inequiâneo".

Equiano: o mesmo que "coetâneo". Diz-se de um povoamento florestal composto por árvores de uma mesma idade. Caso contrário, o povoamento florestal é dito dissetâneo.

Estado: em programação dinâmica, diz-se dos diferentes pontos em um determinado "estágio" em que uma decisão pode ser tomada.

Estágio: em programação dinâmica, diz-se das várias fases ou etapas, ao longo de um horizonte de planejamento, em que uma determinada decisão parcial e sequencial pode ser tomada.

Floresta: um agregado de povoamentos florestais com diferentes características, formando, no seu conjunto, uma unidade heterogênea composta por sub-unidades homogêneas. Para fins de "planejamento e manejo florestal", uma floresta, no entanto, não precisa ser necessariamente uma área contínua, coberta por povoamentos florestais. A descontinuidade não impede que o "recurso florestal" possa ser submetido a algum processo de planejamento ou que o seu "manejo" não possa ser efetivado.

Heteróclito: diz-se do povoamento florestal formado por árvores de mais que uma espécie. (ver "Povoamento Florestal").

Heurística: diz-se da filosofia implícita ao desenvolvimento de uma estratégia concebida para a identificação de uma "solução satisfatória" para um problema, mas que não é, necessariamente, uma "solução ótima", no sentido específico de otimização em Pesquisa Operacional (DAELLENBACH et al.⁴², p.647). Ou seja, um conjunto de regras, elaboradas em resultado à experiência, criatividade e intuição de um analista, como em modelos de simulação, mas que podem, no entanto, conduzir a uma solução aceitável para um determinado problema. (do Grego *heuriskein* = descobrir).

Homóclito: um povoamento florestal formado por árvores de somente uma única espécie. (ver "Povoamento Florestal").

Horizonte de Planejamento: o período de tempo entre o momento presente e um momento futuro, além do qual nenhum evento pode ser considerado relevante para o agente da decisão. A não-relevância indica que não existe nenhuma expectativa além daquele momento futuro, ou que não se pode atribuir nenhum valor físico ou monetário a tais expectativas, se estas porventura existirem.

Manejo Florestal: é o processo de se decidir sobre a composição, estrutura e localização de um recurso florestal de tal modo que seja possível produzir produtos, serviços e benefícios, na quantidade e na qualidade requeridas por uma organização florestal ou por toda uma sociedade.

Povoamento Florestal: uma área contínua com cobertura florestal, em qualquer fase do seu desenvolvimento, suficientemente homogênea na sua composição de espécies, distribuição das classes de idade e condição silvicultural, de tal forma que, se um tratamento silvicultural a ela for aplicado, o mesmo efeito ou consequência poderá ser observado em toda a sua extensão (adaptado após SMITH¹³⁴, p.18).

Recorrência: em Programação Dinâmica, diz-se da ação de recorrer, retornando ao ponto de partida imediatamente anterior, antes de concluir mais uma etapa intermediária, e fazendo uso, desta forma, de uma informação já disponível no estágio precedente. Dirigir ou percorrer um arco (em um Modelo de Rede), valendo-se de uma informação numérica já disponível anteriormente (ou seja, "recorrendo" àquela informação).

Rotação: período de tempo, em anos, decorrido entre o estabelecimento de um povoamento florestal e o seu "corte raso" ou "corte final" (i.e., a oportunidade em que ocorre o corte simultâneo de todas as árvores produzidas e ainda disponíveis naquele momento). Após o corte final, um outro povoamento florestal pode (ou não) ser novamente estabelecido.

Regime de Alto Fuste: diz-se que um povoamento florestal foi estabelecido segundo o "regime de alto fuste" quando aquele foi obtido por meio do plantio de mudas originadas pela germinação de sementes.

Silvicultura: ciência constituída pela teoria e pela prática do controle do estabelecimento, da composição e do crescimento de povoamentos florestais (SMITH¹³⁴, p.1-18).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1 ABREU, P. S. C. **Metodologia para regulação da produção de desbastes**. Curitiba, 1974. 197p. Dissertação, Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- 2 ACKOFF, R. L. & SASIENI, M. W. **Fundamentals of operations research**. New York, J. Wiley, 1968. 455p.
- 3 ADAMS, D. M. & EK, A. R. Derivation of optimal stand management guides for individual stands. In: Meadows, J.; Bare, B. B.; Ware, K. & Row, C. (editores) **SYSTEM ANALYSIS AND FOREST RESOURCE MANAGEMENT**, Athens, 1975. **Proceedings** Bethesda, Maryland, Society of American Foresters, 1975. p.132-47.
- 4 AHRENS, S. A concepção de regimes de manejo para plantações de *Pinus* spp. no Brasil. Curitiba, EMBRAPA-CNPFFlorestas, 1985. 23p. (Circular Técnica, 10).
- 5 AMIDON, E. L. & AKIN, G. S. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. **Forest Science**,14(3):287-91. 1968
- 6 ARDUINO, A. **Programação dinâmica**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 1972. 162p.
- 7 ARIMIZU, T. Applications of dynamic programming to forestry - on intermediate cuttings. In: **THIRD MEETING OF THE OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF JAPAN**, Tokio, 1958. **Proceedings**. Tokio, Faculty of Engineering, University of Tokio, 1958.
- 8 _____. Dynamic programming in forestry. **Journal of the Japanese Forestry Society**,41(11):448-58. 1959.
- 9 ARIS, G. **Discrete dynamic programming**. New York, Blaisdell Pub. Co., 1964. 148p.
- 10 ASSMAN, E. **The principles of forest yield study**. New York, Pergamon Press, 1970. 506p.
- 11 AVERY, T. E. & BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 3.ed. New York, Mc.Graw-Hill, 1983. 331p.
- 12 BAILEY, G. R. **Wood allocation by dynamic programming**. Ottawa, Ontario, Canadá, Canadian Forestry Service, 1973. (Publication 1321). n.p.

- 13 BAKER, F. S. **Principles of silviculture.** New York, McGraw-Hill, 1950. 414p.
- 14 BELLMAN, R. **Dynamic programming.** Princeton, NJ, Princeton University Press. 1957. 337p.
- 15 _____. & DREYFUS, S. E. **Applied dynamic programming.** Princeton, N.J., Princeton University Press, 1962. 363p.
- 16 BENTLEY, W. R. & TEEGUARDEN, D. E. Financial maturity: a theoretical review. **Forest Science**,11(1):76-87. 1965.
- 17 BERGER, R. **Aplicação de critérios econômicos para determinação da maturidade financeira de povoamentos de eucalipto.** Curitiba, 1985, 85p. Tese, Professor Titular, Universidade Federal do Paraná.
- 18 BERTALANFFY, L. von The theory of open systems in Physics and Biology. **Science**,3:23-29. 1950.
- 19 _____. **General systems theory.** New York, George Brasilier, 1968.
- 20 BERTOLOTI, G.; SIMÕES, J. W.; NICOLIELO, N. & GARNICA, J. B. Efeito de diferentes métodos e intensidades de desbaste na produtividade de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.. **IPEF**,24:47-54. 1983.
- 21 BRODIE, J. D.; ADAMS, D. M. & KAO, C. Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-Fir, using dynamic programming. **Forest Science**,24(4):513-522. 1978.
- 22 _____. & KAO, C. Optimizing thinning in Douglas-Fir with three descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. **Forest Science**,25(4):665-72. 1979.
- 23 _____. & HAIGHT, R. G. Optimization of silvicultural investments for several types os stand projection systems. **Canadian Journal of Forestry Research**,15(1):188-91. 1985.
- 24 BRONSON, R. **Pesquisa operacional.** São Paulo, Mc. Graw-Hill do Brasil Ltda., 1985. 318p.
- 25 BUCKMAN, R. E. **Growth and yield of red pine in Minnesota.** Washington, DC, USDA - Forest Service, 1962. 50p. (Technical Bulletin, 1272).
- 26 BUONGIORNO, J. & GILLESS, J. K. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods.** New York, MacMillan, 1987. 285p.

- 27 BURGER, D. **Ordenamento florestal I: a produção florestal.** Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Curso de Engenharia Florestal, 1976. (apostila do Curso de Graduação em Engenharia Florestal). p. irr.
- 28 CARNEIRO, J. G. de A. Desbastes florestais. *Floresta*,4(3): 45-56. 1973.
- 29 CARNIERI, C. **Planejamento florestal otimizado via redes de manejo.** Campinas, 1989. 144p. Tese, Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Sistemas.
- 30 CHAPMAN, H. H. **Forest management.** Bristol, Conn., Hildreth Press, 1950. 582p.
- 31 CHAPPELE, D. E. & NELSON, T. C. Estimating the optimal stocking levels and rotation ages of loblolly pine. *Forest Science*,10(4):471-502. 1964.
- 32 CHEN, C. M.; ROSE, D. W. & LEARY, R. A. **How to formulate and solve optimal stand density over time problems for even-aged stands using dynamic programming.** St. Paul, USDA-Forest Service, North-Central Forest Experiment Station, 1980a. 17p. (General Technical Report NC-56).
- 33 _____; _____ & _____. Derivation of optimal stand density over time - a discrete stage, continuous state dynamic programming solution. *Forest Science*,26(2):217-27. 1980b.
- 34 CHIAVENATO, I. **Teoria geral da administração.** 2.ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1976. v.2, 609p.
- 35 CHRISTIANSEN, N. B. Forest resource management as a system. *Journal of Forestry*,66(10):778-81. 1968.
- 36 CHURCHMAN, C. W.; ACKOFF, R. L. & ARNOFF, E. L. **Introduction to operations research.** New York, J. Wiley, 1957. 645p.
- 37 _____. **The systems approach.** New York, Delacoste Press, 1968. 243p.
- 38 CLEMMONS, J. W. New techniques in individual tree description for the basis of economic decision making. In: SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS ANNUAL MEETING. **Proceedings ...** Washington, DC, Society of American Foresters, 1966. p.197-200.
- 39 CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science*,9(3):354-71. 1963.

- 40 _____; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber Management: a quantitative approach.** New York, J. Wiley, 1983. 333p.
- 41 DAELLENBACH, H. G. & KLUYVER, C. A. de Note on multiple objective dynamic programming. **Journal of the Operations Research Society**,31(7):591-4. 1980.
- 42 _____; GEORGE, J. A. & McNICKLE, D. C. **Introduction to operations research techniques.** Boston, Allyn & Bacon, 1983. 711p.
- 43 DANIEL, T. W.; HELMS, J. A. & BAKER, F. S. **Principles of silviculture.** 2.ed. New York, McGraw-Hill Book Co., 1979. ___P.
- 44 DAVIS, K. P. Determination of desirable growing stock - a central problem of forest management. **Journal of Forestry**,54:811-5, 1956.
- 45 _____. **Forest management: regulation and valuation.** 2.ed. New York, McGraw-Hill Book Co., 1966. 519p.
- 46 DAVIS, L. S. & JOHNSON, K. N. **Forest management.** 3.ed. New York, McGraw-Hill Book Co., 1987. 790p.
- 47 DREYFUS, S. E. & LAW, A. M. **The art and theory of dynamic programming.** New York, Academic Press, 1977. 283p.
- 48 DUERR, W. A.; FEDKIW, J. & GUTTEMBERG, S. **Financial maturity: a guide to profitable timber growing.** Washington, DC, USDA-Forest Service, 1956. 74p. (General Technical Bulletin, 1146).
- 49 _____. **Fundamentals of forestry economics.** New York, McGraw-Hill, 1960. 579p.
- 50 _____; TEEGUARDEN, D. E.; GUTTEMBERG, S. & CHRISTIANSEN, N. B. (editores) **Forest resources management: decision-making principles and cases.** Philadelphia, W.B. Saunders, 1979. 612p.
- 51 _____. **Forestry economics as problem solving.** Blacksburg, VA, 1986. p. irr.
- 52 DYKSTRA, D. P. **Mathematical programming for natural resource management.** New York, McGraw-Hill Book Co., 1984. 318p.

- 53 EMERENCIANO, D. B. **Avaliação da produção e economicidade do primeiro desbaste em um ensaio de Pinus eliottii e Pinus taeda.** Curitiba, 1990, 182p. Tese, Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- 54 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, Curitiba PR. **Zoneamento Ecológico para Plantios Florestais no Estado do Paraná.** Brasília, DF, EMBRAPA - Departamento de Difusão de Tecnologia, 1986, 89p. (EMBRAPA-CNPFFlorestas. Documentos, 17).
- 55 ENG, G.; DAELLENBACH, H. G. & WHYTE, A. G. D. Bucking tree length optimally. **Canadian Journal of Forestry Research**, 16 (4):1030-5. 1986.
- 56 EVANS, J. **Plantation forestry in the tropics.** Oxford, Oxford University Press, 1984. 472p.
- 57 FAALAND, B. & BRIGGS, D. Log bucking and lumber manufacturing using dynamic programming. **Management Science**, 30(2):245-7. 1984.
- 58 FABER, P.; GOOR, C. P. van; HEINSDIJK, D.; OLDENKAMP, L.; KRONKA, F. J. N.; ASCOLY, R. B. & NASCIMENTO, R.; Estudo sobre o crescimento e tabelas de produção preliminares de *Pinus eliottii* (Engelm.) para o Sul do Brasil. **Silvicultura em São Paulo**, 9:87-116. 1975.
- 59 FEDKIW, J. & YOHO, J. G. Financial maturity - what's it good for? **Journal of Forestry**, 54(9):587-90. 1956.
- 60 FENTON, R. Rotations in man-made forests. In: WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FORESTS AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE, Canberra, 1967. **Proceedings ...** Roma, Food and Agriculture Organization, 1967. p.600-14.
- 61 FERNANDES, N. P. **Estudo de crescimento e cálculo de idade de rotação para o manejo da produção florestal para as espécies *Carapa guianensis* Aubl. e *Calophyllum angulare* A. C. Smith.** Manaus, 1985, 1335p. Dissertação, Mestrado, Fundação Universidade do Amazonas, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Curso de Pós-Graduação em Manejo Florestal.
- 62 FERREIRA, A. B. de H. **Novo dicionário da Língua Portuguesa.** 2.ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1986. 1838p.

- 63 FERREIRA, C. A. & TIMONI, J. L. Contribuição ao estudo da determinação da época de corte em povoamentos de *Eucalyptus* spp. (*E. urophylla*, *E. grandis* e *E. saligna*). In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3. Anais do Manaus, 1978, Sociedade Brasileira de Silvicultura. São Paulo, 1878, Sociedade Brasileira de Silvicultura, p.85-6.
- 64 FISHWICK, R. W. Uso do percentual de espaçamento relativo de Hart/Becking para o controle dos desbastes. Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal, PRODEPEF (PNUD/FAO/IBDF/BRA-45), 1975. 5p. (relatório não publicado).
- 65 FORTSON, J. C. Factors affecting the discount rate for forestry investments. *Forest Products Journal*, 36(6):67-72. 1986.
- 66 _____. & FIELD, R. C. Capital budgeting techniques for forestry: a review. *Southern Journal of Applied Forestry*, 3(4):141-3. 1979.
- 67 GADOW, K. von Harvest scheduling in commercial timber plantations. In: RESEARCH CONTRIBUTIONS TO PLANTATION FORESTRY, 1988. Faculty of Forestry, University of Stellenbosh. p.150-70.
- 68 GARAGORRY, F. & VEIL, J. M. Algumas aplicações da programação dinâmica à teoria da amostragem estratificada. Brasília, DF, EMBRAPA - Departamento de Processamento de Dados, 1975. 9p. (não publicado).
- 69 GARRIDO, M. A. de O.; GARRIDO, L. M. do A. G.; RIBAS, C.; ASSINI, J. L.; HAGA, N. & VILAS BOAS, O. Confronto entre métodos de desbaste. Instituto Florestal de São Paulo, *Boletim Técnico*, v.38, n.1: 1984. p. 13-33.
- 70 GREGORY, G. R. *Forest resource economics*. New York, Ronald Press Co., 1972. 548p.
- 71 GRUT, M. Methods of estimating the most profitable thinning programme. *Forestry in South Africa*(14):25-9. 1973.
- 72 HAFLEY, W. L.; SMITH, W. D. & BUFORD, M. A. A new prediction model for unthinned loblolly pine plantations. Raleigh, NC, North Carolina State University, School of Forest Resources - Bioeconomic Modeling Project, 1982. 17p. (Technical Report, 1).

- 73 HANN, D. W. & BRODIE, J. D. **Even-aged mangement: basic managerial questions and available or potential techniques for answering them.** Ogden, Utah, USDA - Forest Service, Intermountain Forest and range Experiment Station, 1980. 29p. (General Technical Report INT-83)
- 74 _____.; _____. & RIITERS, K. H. Optimum stand prescriptions for ponderosa pine. **Journal of Forestry**,81(9): 595-8. 1983.
- 75 HILLER, F. S. & LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** Rio de Janeiro, CAMPUS/EDUSP, 1988. 805p.
- 76 HOFFMANN, R. & THAME, A. C. de M. Determinação da idade ótima para primeiro desbaste em povoamentos de **Pinus caribaea**. Piracicaba, ESALQ - Depto. de Ciências Sociais Aplicadas, Convênio ESCO-MA / ESALQ-USP. 1970. 39p.
- 77 _____. & BERGER, R. Determinação da idade ótima de corte de povoamentos de **Eucalyptus**. **IPEF**(7):49-69. 1973.
- 78 _____. & VIEIRA, S. Eucalyptus growth curves and the determination of the optimal cutting age. **Revista de Econometria**,5(1):1-18. 1985.
- 79 HOOL, J. N. A dynamic programming - probabilistic approach to forest production control. In: **FOREST RESOURCE DECISIONS IN A CHANGING POWER STRUCTURE**, Detroit, Society of American Foresters, 1965. **Proceedings**. Washington, DC, Society of American Foresters, 1966. p.180-5.
- 80 _____. A dynamic programming-markov chain approach to forest production control. **Forest Science**, Monograph 12. 1966. 26p.
- 81 HUSCH, B.; MILLER, C. I. & BEERS, T. W. **Forest mensuration.** New York, J. Wiley, 1972. 410p.
- 82 JACOBS, O. L. R. **An introduction to dynamic programming: the theory of multistage decision processes.** London, Chapman & Hall, 1967. 126p.
- 83 JOHNSTON, D. R.; GRAYSON, A. J. & BRADLEY, R. T. **Forest planning.** Londres, Faber & Faber, 1967. 541p.
- 84 KAO, C. **A study of optimal timing and intensity of silvicultural practices - commercial and precommercial thinning, fertilization and regeneration effort.** Corvallis, 1980, 219p. Tese, Doutorado, Oregon State University.

- 85 KAO, C. Optimal stocking levels and rotation under risk. *Forest Science*,28(4):672-719. 1982
- 86 KENNEDY, J. O. S. **Dynamic programming**: applications to agriculture and natural resources. New York, Elsevier, 1986. 341p.
- 87 KILKKI , P. & VAISANEN, U. Determination of the optimum cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. *Acta Forestalia Fennica* (102):100-12. 1969.
- 88 _____. **Timber management planning**. University of Joensuu, Faculty of Forestry, 1985. 169p. (Silva Carelica, 5).
- 89 KLUYVER, C. A. de; DAELLENBACH, H. G. & WHYTE, A. G. D. A two-stage, multiple objective mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting. *Forest Science*,26(4): 674-86. 1980.
- 90 KNUCHEL, H. **Planning and control in the managed forest**. Edimburgh, Oliver & Boyd, 1953.360p.
- 91 KÖSTLER, J. **Silviculture**. Edinburgh, Oliver and Boyd, 1956. 416p.
- 92 LARSON, R. E. & CASTI, J. L. **Principles of dynamic programming**. Part I - basic analytic and computational methods. New York, Marcel Dekker, 1978. 329p.
- 93 LEMBERSKY, M. R. & JOHNSON, K. N. Optimal policies for managed stands: an infinite horizon markov decision process approach. *Forest Science*,21(2):109-22. 1975.
- 94 _____. Maximum average annual volume for managed stands. *Forest Science*,22(1):69-81. 1976.
- 95 LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York, J. Wiley, 1984. 298p.
- 96 LINNARD, M. A. **Martin Faustman and the evolution of discounted cash flow**. Oxford, University of Oxford, Commonwealth Forestry Institute, 1968. 55p. (Institute Paper 42).
- 97 MARTIN, G. L. & EK, A. R. A dynamic programming analysis of silvicultural alternatives for red pine plantations in Wisconsin. *Canadian Journal of Forestry Research*,11(2): 370-9. 1981.
- 98 MEDEMA, E. L. & LYON, G. W. The determination of financial rotation ages for coppicing tree species. *Forest Science*,31(2):398-404. 1985.

- 99 MONTEIRO, R. F. R. & CORDEIRO, J. A. Ensaio conjugado de espaçamentos e de métodos de desbaste em *Pinus elliottii* Engelm. *Silvicultura*, 8(28):373-5. 1982.
- 100 NASLUND, B. Optimal rotation and thinning. *Forest Science*, 15(4):446-51. 1969.
- 101 NEMHAUSER, G. L. *Introduction to dynamic programming*. New York, J. Wiley, 1966. 256p.
- 102 NEWMAN, D. *The optimal forest rotation: a discussion and annotated bibliography*. Asheville, NC, USDA - Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1988, 47p. (General Technical Report SE-48).
- 103 NICOLIELO, N. Aspectos gerais do manejo florestal em florestas homogêneas de *Pinus* spp. In: ENCONTRO DE DEBATES SOBRE MANEJO DE PINUS, Ponta Grossa, PR, 1985. *Anais*. Associação Brasileira de Produtores de Madeira - Departamento Regional do Paraná, 1985. p.31-40.
- 104 _____. Manejo de *Pinus* spp. em sistema de alto fuste na Duraflora S.A.. In: MANEJO DE FLORESTAS PLANTADAS, Esteio, RS, 1991. *Anais*. Santa Maria, RS, Associação Gaúcha de Empresas Florestais - AGEFLOR, Centro de Pesquisas Florestais - UFSM/CEPEF, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal - UFSM/CPGEF, 1991. p.33-7.
- 105 NORTON, G. A. & HOLLING, C. S. *Pest management*. Oxford, Pergamon Press, 1976.
- 106 OHLSON, J. C. & DUARTE, J. R. Avaliação de regimes de manejo para *Pinus* sp. através do valor líquido presente (VLP). In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., Campos do Jordão, SP, 1990. São Paulo, SP, Sociedade Brasileira de Silvicultura & Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 1990. p.16. Resumo.
- 107 OLIVEIRA, J. A. N. *Engenharia econômica: uma abordagem às decisões de investimento*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1982. 172p. + apêndices.
- 108 OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de & HAFLEY, W. L. SisPinus - simulador de crescimento e de produção para plantios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* no Sul do Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2. *Anais*. Curitiba, 1989, EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. EMBRAPA - CNPFlorestas, 1990. p.109-18.

- 109 OMMULE, S. A. Y. & WILLIAMS, D. H. Optimum allocation by dynamic programming for sampling on successive occasions with partial replacement of units. **Canadian Journal of Forestry Research**,12(2):264-69. 1982.
- 110 O'REGAN, W. G.; KOURTZ, P. H. & NOZAKI, S. Patrol route planning for an airborne infrared forest fire detection system. **Forest Science**,21(4):382-9. 1975.
- 111 PAEZ, G. **Considerações gerais sobre o enfoque de sistema e sua aplicação na pesquisa agropecuária**. Brasília/IICA, 1975. 39p. (não publicado, versão em Português, trabalho apresentado na reunião de ALPA, Maracay, Venezuela).
- 112 PAREDES-VELOSO, G. L. & BRODIE, J. D. Efficient computation considerations in optimization of stand-level management regimes. In: Dress, P. E. & Field, R. C. (editores) **THE 1985 SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES**, Athens, GA, 1985. **Proceedings**. Athens, GA, Georgia Center for Continuing Education, 1987a. p.292-302.
- 113 _____. & _____. Efficient specification and solution of the even-aged rotation and thinning problem. **Forest Science**,33(1):14-29. 1987b.
- 114 PAULA Jr., G. G. de; REZENDE, J. L. P. de & COUTO, L. Localização dinâmica de carvoarias. **Revista Arvore**,11(2): 158-74. 1987.
- 115 PNEVMATICOS,, S. M. & MANN, S. H. Dynamic programming in tree bucking. **Forest Products Journal**,22(2):26-30. 1972.
- 116 PUCCI, J. A. de L. Manejo de Pinus na fazenda Monte Alegre. In: ENCONTRO DE DEBATES SOBRE MANEJO DE FLORESTAS DE PINUS, Ponta Grossa, PR, 1985. **Anais**. Associação Brasileira de Produtores de Madeira - Departamento Regional do Paraná, 1985. p.22-30.
- 117 RAMOS, I. **Africa do Sul: horizonte florestal do Brasil**. São Paulo, Jorues, 1973. 81p.
- 118 RIBAS, L. C. **Estratégia econômica da reforma de povoamentos florestais de Pinus spp**. Curitiba, 1989, 112p. Dissertação, Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- 119 RIITERS, K.; BRODIE, J. D. & HANN, D. W. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. **Forest Science**,28(3):517-26. 1982.

- 120 RISVAND, J. Economic analysis of cutting programs applying dynamic programming. In: Svendsrud, A. (editor) READINGS IN FOREST ECONOMICS - on selected topics within the field of forest economics. Oslo, Nordic Forest Economics Seminar, Universitetsforlaget, 1969. p.73-9.
- 121 _____. Dynamic programming for determining optimum cutting policies for a forest enterprise. In: OPERATIONS RESEARCH AND THE MANAGERIAL ECONOMICS OF FORESTRY, Farnham, 1970. **Proceedings**. London, IUFRO & Forestry Commission, 1971. (Forestry Commission Bulletin 44, 1971). p.43-52.
- 122 ROSE, D. W. Optimum thinning schedules for maximum biomass production. In: Whitmore, J. L. (editor), WOOD PRODUCTION IN THE NEOTROPICS VIA PLANTATIONS, Rio Piedras, Porto Rico, 1980. Rio Piedras, Porto Rico, IUFRO/MAB/USDA-Forest Service / Institute of Tropical Forestry, 1980. p.182-93.
- 123 _____.; EK, A. R. & STONEL, J. Practical modelling approaches to the determination of thinning schedule. In: IUFRO INTERNATIONAL INTERDIVISIONAL CONFERENCE ON THINNING, Moscow & Riga, 1985. **Proceedings** IUFRO & All-Union Research Institute of Silviculture and Forestry Mechanization, 1985. 16p.
- 124 RUSTAGI, K. P. Optimality criteria in rotation. **Indian Forester**, 101(8):429-33. 1975.
- 125 SAKAI, T. Studies on forest management system (I) - optimum thinning plan. **Bulletin of the Kyoto University Forests** (63):146-53. 1991.
- 126 SAVILL, P. S. & EVANS, J. **Plantation silviculture in temperate regions**: with special reference to the British islands. New York, Oxford University Press, 1983. 161p.
- 127 SCHNEIDER, P. R. **Manejo florestal I: tópicos de planejamento da produção florestal**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Ciências Florestais, 1986. (apostila do Curso de Graduação em Engenharia Florestal). 289p.
- 128 SCHREUDER, G. F. **Optimal forest investment decisions through dynamic programming**. New Haven, Yale University, School of Forestry, 1968. **Bulletin** 72. 70p.
- 129 _____. The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged stand. **Forest Science**, 17(3):333-9. 1971.

- 130 SCOLFORO, J. R. S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e da produção, com otimização de remuneração de capitais, para Pinus caribaea var. hondurensis.** Curitiba, 1990, 290p. Tese, Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- 131 SHEPHERD, K. S. **Plantation silviculture.** Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1986. 332P.
- 132 SIMÕES, J. W.; BERGER, R.; LEITE, N. B.; BERTOLANI, F.; NICOLIELO, N. & VILLELA Filho, A. **Estudo econômico de sistemas de desbastes.** IPEF,9:3-21. 1974.
- 133 _____.; BRANDI, R. M. LEITE, N. B. & BALLONI, E. A. **Formação, manejo e exploração de florestas com espécies de rápido crescimento.** Brasília, DF, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF, 1981. 131p.
- 134 SMITH, D. **The practice of silviculture.** 6.ed. New York, J. Wiley, 1962. 578p.
- 135 _____. **The practice of silviculture.** 8.ed. New York, J. Wiley, 1986. 527p.
- 136 SMITH, W. D. & HAFLEY, W. L. **Evaluation of a loblolly pine plantation thinning model.** *Southern Journal of Applied Forestry*,10(1):52-63. 1986.
- 137 SPIECKER, H. **Métodos de pesquisa operacional com aplicação em manejo florestal.** Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curso de Engenharia Florestal, 1975. 146p.
- 138 SPURR, S. H. **Forest inventory.** New York, Ronald Press Co., 1952. 476p.
- 139 TAIT, D. E. **A dynamic programming solution of financial rotation ages for coppicing species.** *Canadian Journal of Forestry Research*,16(4):799-801. 1986.
- 140 TAUXE, G. W.; INMAN, R. R. & MADES, D. M. **Multiobjective dynamic programming: a classic problem redressed.** *Water Resources Research*,15(6):1398-402. 1979a.
- 141 _____.; _____. & _____. **Multiobjective dynamic programming with applications to a reservoir.** *Water Resources Research*,15(6):1403-8. 1979b.
- 142 TEETER, L. D. & CAULFIELD, J. P. **Stand density management strategies under risk: effects of stochastic prices.** *Canadian Journal of Forestry Research*,21(9):1373-9. 1991.

- 143 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Biblioteca Central. **Normas para apresentação de trabalhos**. Curitiba, 1981. 183p.
- 144 VALE, A. B. do; OLIVEIRA, A. D. de; FELFILI, J. M. & QUINTAES, P. C. G. Desbastes florestais. **Brasil Florestal**, (59):45-57. 1984.
- 145 VEIGA, A. de A. **Curso de Atualização Florestal**. Instituto Florestal, Secretaria da Agricultura de São Paulo, São, Paulo, SP. 1972. v.1 p.98-140.
- 146 VEMURI, V. **Modeling of complex systems: an introduction**. New York, Academic Press, 1978. 448p.
- 147 WAGNER, H. M. **Pesquisa operacional**. 2.ed. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1986. 851p.
- 148 WATT, K. E. F. Dynamic programming, "look ahead programming" and the strategy of insect pest control. **The Canadian Entomologist**,95(5):525-36. 1963.
- 149 WATT, A. J. A comparison of some basic concepts of rotation age. **Australian Forestry**,31(4):275-86. 1967.