

NEIDA MARIA PATIAS VOLPI

# **O IMPACTO DE PERTURBAÇÕES ESTOCÁSTICAS EM UM MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL**

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.

Orientador: Prof. Dr. Celso Carnieri

CURITIBA  
1997



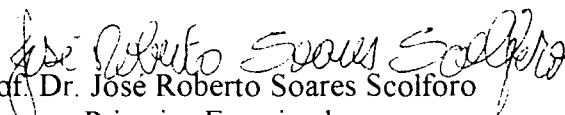
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Tese de **DOUTORADO**, apresentada pela candidata **NEIDA MARIA PATIAS VOLPI**, sob o título **“O IMPACTO DE PERTURBAÇÕES ESTOCÁSTICAS EM UM MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL”**. para obtenção do grau de **Doutor** em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **MANEJO FLORESTAL**.

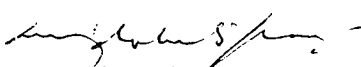
Após haver analisado o referido trabalho e argüido a Candidata são de parecer pela **“APROVAÇÃO”** da Tese; com média final:( 10.0 ), correspondente ao conceito ( **A** ).

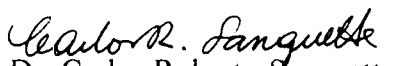
Curitiba, 12 DE DEZEMBRO DE 1997

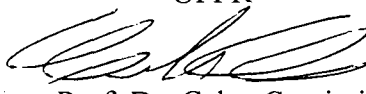
  
Prof. Dr. Jose Roberto Soares Scolforo  
Primeiro Examinador

ESAL

  
Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto  
Segundo Examinador  
PUC -PR

  
Prof. Dr. Luiz Roberto Graça  
Terceiro Examinador  
EMBRAPA - COLOMBO

  
Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta  
Quarto Examinador  
UFPR

  
Prof. Dr. Celso Carnieri  
Orientador e Presidente da Banca  
UFPR

**Aos meus pais**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Celso Carnieri, pelo estímulo, amizade e orientação deste trabalho.

Ao Professor Carlos Roberto Sanquetta, pela paciência e dedicação nos esclarecimentos da área florestal.

Ao Dr. Luiz Roberto Graça, pela orientação nos assuntos da área econômica durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos meus professores e colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal; ao Professor Roberto Hosokawa pela ajuda na superação das dificuldades iniciais para o conhecimento da área florestal; ao Professor Anselmo Chaves Neto que mostrou o grande potencial de utilização da estatística.

Aos meus colegas do Departamento de Matemática da UFPR, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

À PISA Florestal, na pessoa do Engenheiro Romualdo Maestri, pelos esclarecimentos operacionais valiosos do manejo florestal e pela disponibilização dos dados para a realização deste trabalho.

A toda minha família, pela compreensão, apoio e paciência durante todos estes anos de trabalho.

De modo muito especial ao Bruno, Erica e Adilson.

## **BIOGRAFIA**

Neida Maria Patias Volpi, filha de Gelindo Patias e de Rosa Maria Patias, nasceu em Santo Ângelo, RS, em 16 de dezembro de 1953.

Realizou o curso primário na Casa da Criança, Santo Ângelo, RS, o curso ginásial no Colégio Sant'Ana e o científico no Colégio Estadual Regente Feijó, em Ponta Grossa, PR.

Graduou-se em Licenciatura em Matemática, em 1975 e em Bacharelado em Engenharia Civil, no ano de 1983, ambos na Universidade Federal do Paraná.

Obteve o título de Master of Science in Mathematics, na Universidade de Londres, Londres, Inglaterra, em 1979.

Foi professora do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná durante os anos de 1980 até 1982. Em 1981 fez concurso na Universidade Federal do Paraná, onde ocupa hoje o cargo de Professora Adjunto.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xvii
<b>ABSTRACT</b> .....	xviii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	6
1.2.1 <u>Objetivo Geral</u> .....	6
1.2.2 <u>Objetivos Específicos</u> .....	6
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
2.1 CONCEITOS ECONÔMICOS E MATEMÁTICOS.....	8
2.1.1 <u>Empreendimento florestal. Retorno e risco</u> .....	8
2.1.2 <u>Programação Matemática</u> .....	15
2.2 HISTÓRICO DOS MODELOS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL .....	21
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
3.1 MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL.....	34
3.1.1 <u>Introdução</u> .....	34
3.1.2 <u>Restrições</u> .....	34
3.1.2.1 Restrições de área .....	35
3.1.2.2 Restrições de compra de madeira para processo.....	35
3.1.2.3 Restrições de demandas.....	36
3.1.2.4 Restrições de controle de corte de volume global.....	46
3.1.3 <u>Função Objetivo</u> .....	47
3.1.4 <u>O modelo florestal</u> .....	50
3.2 ALGORITMOS USADOS.....	54
3.2.1 <u>Método Simplex</u> .....	54
3.2.2 <u>Método Simplex Revisado</u> .....	57
3.2.3 <u>Método Generalized Upper Boundings - GUB</u> .....	59
3.2.4 <u>GUB aplicado ao modelo florestal</u> .....	63

3.3	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL.....	68
3.3.1	<u>Cálculos para o desenvolvimento do programa RESOLVE.FOR</u> .....	68
3.3.2	<u>Programa computacional: RESOLVE.FOR</u> .....	84
3.4	DADOS UTILIZADOS NO MODELO BÁSICO.....	87
3.4.1	<u>Área</u> .....	94
3.4.2	<u>Demanda</u> .....	94
3.4.3	<u>Preços</u> .....	95
3.4.4	<u>Volume máximo de compra de madeira para processo</u> .....	96
3.4.5	<u>Controle de volume de corte nos <math>P</math> primeiros anos de planejamento</u> .....	96
3.4.6	<u>Custos de manejo</u> .....	97
3.4.6.1	Atividades e regimes de manejo.....	97
3.4.6.2	Detalhamento dos cálculos de custos.....	106
3.4.7	<u>Valor terminal</u> .....	116
3.4.7.1	Valor esperado da terra.....	118
3.4.7.2	Valor do estoque em pé.....	122
3.4.7.3	Valor terminal.....	126
3.4.8	<u>Coefficientes de produção</u> .....	127
3.4.8.1	Introdução.....	127
3.4.8.2	Utilização do programa SISPINUS para obtenção dos arquivos de dados de produções TsdP/Nreg.SIS.....	128
3.4.8.3	Utilização do programa CRIAESP.FOR para obtenção dos arquivos de produções específicos.....	134
3.4.8.4	Utilização do programa CRIACPRO.FOR para obtenção dos arquivos de produções máximas.....	136
3.5	SIMULAÇÕES COM O MODELO BÁSICO.....	138
3.5.1	<u>Introdução</u> .....	138
3.5.2	<u>Simulações estocásticas</u> .....	142
3.5.2.1	Simulações normais.....	142
3.5.2.2	Simulações uniformes.....	148
3.5.3	<u>Cenários sistemáticos</u> .....	150
3.5.4	<u>SIMULA.FMK. Sistema completo de simulações</u> .....	152

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	159
4.1	ANÁLISE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA NO MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL.....	159
4.1.1	<u>Análise do modelo quanto à escolha da Função Objetivo</u> .....	159
4.1.2	<u>Análise do modelo quanto ao horizonte de planejamento <i>PP</i></u> .....	161
4.1.3	<u>Análise do modelo quanto à escolha das restrições</u> .....	162
4.1.4	<u>Análise quanto à resolução do modelo</u> .....	163
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO BÁSICO.....	163
4.2.1	<u>Resultados</u> .....	163
4.2.2	<u>Análise dos resultados</u> .....	173
4.2.3	<u>Comparação entre os resultados usando o valor terminal <i>VT</i> na função objetivo e sem usar o <i>VT</i></u> .....	183
4.3	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NO MODELO BÁSICO.....	186
4.3.1	<u>Análise das simulações estocásticas e cenários dos dados de produção</u> .....	186
4.3.1.1	Simulações normais.....	186
4.3.1.2	Simulações uniformes.....	192
4.3.1.3	Cenários sistemáticos.....	195
4.3.2	<u>Análise das simulações estocásticas e dos cenários dos custos de manejo</u> .....	198
4.3.2.1	Simulações normais.....	198
4.3.2.2	Cenários sistemáticos.....	203
4.3.3	<u>Análise das simulações estocásticas e dos cenários dos preços dos produtos</u> .....	205
4.3.3.1	Simulações normais.....	205
4.3.3.2	Cenários sistemáticos.....	210
4.3.4	<u>Análise das simulações e dos cenários das demandas dos produtos</u> .....	212
4.3.4.1	Simulações normais.....	212
4.3.4.2	Cenários sistemáticos.....	215
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO MODELO BÁSICO E OS DO MODELO PERTURBADO.....	217
4.4.1	<u>Em relação ao tamanho das amostras</u> .....	217
4.4.2	<u>Em relação à normalidade dos resultados</u> .....	218
4.4.3	<u>Em relação aos resultados</u> .....	219



4.5	<b>DISCUSSÃO GERAL</b> .....	228
4.5.1	<u>Em relação à metodologia proposta</u> .....	228
4.5.2	<u>Em relação ao modelo básico</u> .....	230
4.5.3	<u>Em relação ao estudo de caso</u> .....	230
4.5.4	<u>Considerações gerais</u> .....	231
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	234
5.1	CONCLUSÕES.....	234
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	236
	<b>ANEXOS</b> .....	238
	ANEXO 1.....	238
	ANEXO 2.....	240
	ANEXO 3.....	242
	ANEXO 4.....	244
	ANEXO 5.....	246
	ANEXO 6.....	248
	ANEXO 7.....	257
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	264

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
01	Relação risco x retorno.....12
02	Modelagem x simulação.....20
03	Utilização máxima dos produtos florestais por bitola comercial.....38
04	Matriz tecnológica $A$ do modelo florestal.....52
05	Representação de parte da matriz tecnológica - Matriz $M_0$ .....64
06	Representação de parte da matriz tecnológica - Matriz $M_i$ .....65
07	Fluxograma do programa RESOLVE.FOR.....86
08	Dimensão da matriz tecnológica para o estudo de caso e posição das variáveis.....88
09	Distribuição dos estratos por idade.....92
10	Distribuição dos estratos por índice de sítio.....92
11	Distribuição dos estratos por densidade de plantio.....93
12	Distribuição dos estratos por região de colheita.....93
13	Retorno de projetos.....151
14	Esquema do projeto SIMULA.FMK.....158
15	Distribuição das idades dos estratos no início do planejamento.....174
16	Distribuição das idades dos estratos no final do planejamento.....174
17	Produção de madeira para processo, estimado pelo modelo de planejamento.....184
18	Produção total de madeira estimado pelo modelo de planejamento.....184
19	Distribuição da Função Objetivo com perturbações normais em dados de produção..... .....191

Figura	Página
20	Distribuição da Função Objetivo com perturbações uniformes em dados de produção.... .....196
21	Efeito na Função Objetivo das variações sistemáticos nos dados de produção.....197
22	Distribuição da Função Objetivo com perturbações normais nos custos de manejo...202
23	Efeito na Função Objetivo das variações sistemáticos dos custos de manejo.....204
24	Distribuição da Função Objetivo com perturbações normais nos preços dos produtos.... .....209
25	Efeito na Função Objetivo das variações sistemáticos nos preços dos produtos.....211
26	Efeito na Função Objetivo das variações sistemáticos nas demandas dos produtos...216
27	Relação entre coeficientes de variação dos dados de entrada e dos valores de <i>FO</i> obtidos nas simulações.....220
28	Funções objetivos médias de cada amostra.....222
29	Efeito na Função Objetivo das variações sistemáticas nos coeficientes de produção, custos de manejo, demandas e preços dos produtos.....224

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
01 Descrição dos produtos florestais considerados no modelo, sua abreviação e estrato origem.....	37
02 Grupos de variáveis do modelo.....	68
03 Arquivos de dados utilizados no programa RESOLVE.FOR.....	88
04 Representatividade das áreas dos estratos podados e não-podados em função da região, da classe de sítio e da densidade de plantio.....	89
05 Percentual das áreas podadas e não-podadas, por região.....	91
06 Distribuição dos estratos por idade.....	91
07 Preços dos produtos.....	95
08 Preços dos produtos utilizados no modelo.....	96
09 Idades de corte e desbastes dos regimes de manejo considerados no modelo.....	98
10 Custos de manejo em US\$/ha.ano.....	99
11 Custos de colheita e transporte em US\$/m <sup>3</sup> no ano de corte.....	99
12 Custos de implantação em US\$/ha.....	100
13 Custos de manutenção1 em US\$/ha.....	101
14 Custos de manutenção2 em US\$/ha.....	102
15 Custos de manutenção3 em US\$/ha.....	102
16 Custos de manutenção4 em US\$/ha.....	102
17 Custos de manutenção após ano 4 em US\$/ha.....	102
18 Informações dos estratos no arquivo ESTRATO2.FOR.....	105

Tabela	Página
19	Cálculo de custos de implantação em US\$/ha.....108
20	Cálculo de custos de manutenção na idade 1 em US\$/ha .....109
21	Cálculo de custos de manutenção na idade 2 em US\$/ha .....109
22	Cálculo de custos de manutenção na idade 3 em US\$/ha .....109
23	Cálculo de custos de manutenção na idade 4 em US\$/ha .....110
24	Cálculo de custos de manutenção após idade 4 em US\$/ha.....110
25	Cálculo de custos de poda e desbaste pré-comercial em US\$/ha.....111
26	Custos de colheita por produto em US\$/m <sup>3</sup> .....112
27	Custos de transporte por classe de distância.....112
28	Distâncias médias: região x centro de operações.....113
29	Custos médios de colheita e transporte em US\$/m <sup>3</sup> .....113
30	Cálculo dos custos de colheita e transporte para os regimes de manejo R1, R2 e R3 em US\$/m <sup>3</sup> .....114
31	Cálculo dos custos de colheita e transporte para os regimes de manejo R4, R5, R6 e R7 em US\$/m <sup>3</sup> .....114
32	Cálculo dos custos de colheita e transporte para os regimes de manejo R8, R9, R10 e R11 em US\$/m <sup>3</sup> .....115
33	Cálculo do valor esperado da terra para sítio 1, região 1 e regime 6 - $VET(1,1,6)$ .....120
34	Valor esperado da terra, para sítio $s$ , região $r$ e regime $reg$ - $VET(s,r,reg)$ .....121
35	Cálculo da complementação da receita líquida com o regime economicamente ótimo.....123

Tabela	Página
36	Cálculos da complementação do custo de manutenção pelo regime economicamente ótimo..... 124
37	Cálculo do estoque em pé, no estrato $i$ , regime 6 - $VEP(i,6)$ ..... 125
38	Cálculo do valor terminal em US\$/ha. .... 126
39	Índice de sítio..... 128
40	Produção global por sítio em $m^3/ha$ ..... 129
41	Coefficientes da equação de volume por região..... 130
42	Dimensões de toras..... 130
43	Dimensões de toras para laminados..... 131
44	Idade, tipo e intensidade do desbaste para cada regime..... 131
45	Dados de produção em $m^3/ha$ para os 10 produtos e os 11 regimes de manejo que atuam num estrato não-podado, de sítio 4, densidade de plantio 2 e região 1. Arquivo : T421N.FOR ..... 133
46	Forma geral dos arquivos que contêm os dados de produção dos estratos de um bloco, por regime e por produto..... 134
47	Dados de produção global em $m^3/ha$ , para os 11 regimes em um estrato não-podado, de sítio 4, densidade de plantio 2 e região 1. Arquivo : TA421N.FOR ..... 137
48	Observações x quantis ..... 147
49	Valores dos limites inferior e superior usados na distribuição uniforme..... 149
50	Valores das variáveis de manejo do modelo básico ..... 165
51	Valores das vendas dos produtos do modelo básico ..... 167

Tabela	Página
52	Valores das variáveis de compra de madeira para processo do modelo básico..... 168
53	Estratos abandonados na execução do planejamento..... 168
54	Valores dos preços duais - $MI$ ..... 171
55	Produção por estrato..... 176
56	Produção de madeira para processo, total, compras e vendas por período..... 182
57	Resultados do modelo básico sem $VET$ e com $VET$ ..... 185
58	Estatísticas da amostra de Funções Objetivos com perturbações normais em dados de produção..... 187
59	Teste de hipóteses para $\overline{FO}_{pert}$ - Normal - dados de produção..... 187
60	$CV$ dos dados de produção x $CV$ da $FO$ - perturbação normal..... 188
61	Resultados do Teste de Filliben na amostra de $FO$ , com perturbações normais nos dados de produção..... 189
62	Estatísticas da amostra de Funções Objetivos com perturbações uniformes em dados de produção..... 193
63	Teste de hipóteses para $\overline{FO}_{pert}$ - Uniforme - dados de produção..... 194
64	Amplitude dos dados de produção x $CV$ da $FO$ - perturbação uniforme..... 194
65	Resultados do Teste de Filliben na amostra de $FO$ , com perturbações uniformes nos dados de produção..... 194
66	Valores de $FO$ para variações sistemáticas em dados de produção..... 198
67	Estatísticas da amostra de Funções Objetivos com perturbações normais em custos de manejo..... 199
68	Teste de hipóteses para $\overline{FO}_{pert}$ - Normal - custos de manejo..... 200

Tabela	Página
69	<i>CV</i> dos custos de manejo x <i>CV</i> da <i>FO</i> - Perturbação normal.....200
70	Resultados do Teste de Filliben na amostra de <i>FO</i> , com perturbações normais em custos de manejo.....201
71	Valores de <i>FO</i> para variações sistemáticas nos custos de manejo.....205
72	Estatísticas da amostra de Funções Objetivos com perturbações normais nos preços dos produtos.....206
73	Teste de hipóteses para $\overline{FO}_{pert}$ - Normal - preços dos produtos.....207
74	<i>CV</i> dos preços x <i>CV</i> da <i>FO</i> - Perturbação normal.....207
75	Resultados do Teste de Filliben na amostra de <i>FO</i> , com perturbações normais nos preços .....207
76	Valores de <i>FO</i> para variações sistemáticas nos preços dos produtos.....210
77	Estatísticas da amostra de Funções Objetivos com perturbações normais nas demandas dos produtos.....213
78	Teste de hipóteses para $\overline{FO}_{pert}$ - Normal - demandas dos produtos.....213
79	<i>CV</i> das demandas x <i>CV</i> da <i>FO</i> - Perturbação normal.....213
80	Resultados do Teste de Filliben na amostra de <i>FO</i> , com perturbações normais nas demandas dos produtos.....214
81	Valores de <i>FO</i> para perturbações normais nas demandas.....214
82	Valores de <i>FO</i> para variações sistemáticas nas demandas dos produtos.....215
83	Resultados parciais de <i>CV</i> em % e tamanho mínimo de amostra.....218
84	Coeficientes de variação das amostras.....219
85	Valores médios de <i>FO</i> em US\$.....221



Tabela	Página
86	Valores de $FO$ (US\$) para variações sistemáticas nos dados de entrada.....223
87	Valores de $\eta$ - razão de variabilidade do objeto do sistema.....227

## RESUMO

Nesta tese foi discutido o impacto de perturbações estocásticas em um Modelo de Planejamento Florestal. Foi desenvolvido um modelo de Programação Linear para uma situação particular, a fim de se escolher o melhor regime de manejo para cada estrato florestal, de forma a maximizar o Valor Líquido Presente Geral, sujeito a restrições de ordens técnicas e econômicas. Devido à natureza estocástica dos coeficientes de produção de madeira, dos custos de manejo e exploração (plantio, desbaste, colheita, transporte), dos preços associados aos 10 produtos considerados no modelo e das demandas dos mesmos no mercado, foi desenvolvida uma abordagem, através de simulações estocásticas no modelo de Programação Linear, para analisar e quantificar a variabilidade que ocorre nos valores da Função Objetivo, quando um horizonte de planejamento é considerado. Foram feitas simulações no modelo, com perturbações aleatórias seguindo distribuições normais e/ou uniformes nos coeficientes da Função Objetivo, na matriz tecnológica e no vetor dos recursos, através de um programa computacional, SIMULA, desenvolvido em FORTRAN. Os resultados da Função Objetivo foram apresentados na forma de distribuição, quando possível, permitindo associar probabilidades de ocorrência aos valores do retorno econômico. No presente estudo concluiu-se que as variáveis com maior impacto nos valores da Função Objetivo foram, em primeiro lugar, os preços dos produtos, seguidos pelos coeficientes de produção, pelos custos de manejo e finalmente pelas demandas. As decisões gerenciais, vinculadas a um planejamento florestal, poderão ter um grau maior de confiabilidade se dispuserem dos resultados desta abordagem não-determinística, cuja metodologia de simulação apresentada poderá ser aplicada em qualquer modelo de Programação Linear. O conceito de razão de variabilidade objeto-sistema foi introduzido, para medir a suscetibilidade do sistema, através dos valores da Função Objetivo, em relação a variações ocorridas no objeto.

## ABSTRACT

The impact of stochastic perturbations in a Forest Planning Model was discussed in this thesis. It was developed a Linear Programming Model to a particular case, to choose the best management alternative to each forest stand, in order to maximise the general net discounted revenues, satisfying technical and economical restrictions. An approach was developed using non-deterministic simulations in the Linear Programming Model, in order to analyse and quantify the variability that occur in the Objective Function values, since the production coefficients, timber management costs (planting, thinning, harvesting, transportation), the products market prices and the products demands are of non-deterministic nature, if a planning horizon is considered. Simulations were made in the model, with random perturbations and normal and/or uniform distributions, at various levels of variability, in the coefficients of the Objective Function, in the technological matrix and in the right hand side vector, through a computational program, called *SIMULA*, developed in *FORTRAN* language. The results of the Objective Function were presented in a distribution form, when possible, allowing to associate a probability of occurrence to the revenue obtained by the model. In the present research, it was concluded that the prices of the products were the responsible for the major impact in the values of the Objective Function, followed by the production coefficients, then by the management costs and finally by the demands. The management decisions in forest planning can be more reliable, when the results obtained from this non-deterministic approach are considered, through this kind of simulations, which may be applied to any Linear Programming Model. A new concept was introduced, called object-system ratio of variability, in order to measure the sensibility of the response of the system through the values of the Objective Function, when variations occur in the object.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Pesquisa Operacional foi criada durante a Segunda Guerra Mundial na Inglaterra, com o objetivo de analisar e dar soluções a problemas bélicos, tanto no plano estratégico como no tático. Vários grupos de trabalho surgiram, envolvendo físicos, matemáticos, militares, agrimensores, fisiologistas e astrofísicos. Os problemas estudados, entre outros, envolviam: o emprego eficiente do radar, o uso de canhões antiaéreos, táticas de bombardeio a submarinos e escoltas navais, segundo PUCCINI (1970).

O sucesso destes grupos deveu-se mais à maneira de abordar os problemas complexos, através da coleta de dados e informações, do que à geração de algoritmos especiais de otimização. Porém com a publicação de Dantzig em 1947, do Método Simplex da Programação Linear, a Pesquisa Operacional ganhou uma importância prática fundamental e passou a atender também às áreas da vida civil.

Apesar das técnicas de otimização (Método Simplex e outras) terem aplicações em vários segmentos da área florestal (indústria, transporte, no manejo florestal, entre outros), seu uso em situações práticas, foi inicialmente limitado pela falta de equipamentos computacionais que resolvessem automaticamente os cálculos inerentes aos algoritmos, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas nos modelos de problemas reais.

Segundo NEWHAM (1975), os modelos de planejamento no manejo florestal podem ser considerados de quatro tipos:

1. Modelos detalhados: usados no planejamento diário, principalmente para máquinas individuais ou grupos de máquinas.

2. Modelos de manejo: usados para planejar os desbastes e cortes em povoamentos florestais e no planejamento da malha viária.
3. Modelos de operação: usados para alocação de recursos disponíveis como máquinas, madeira e capacidade de trabalho, de forma que seja minimizado o custo de abastecimento, no menor tempo possível.
4. Modelos econométricos: usados para planejar o suprimento e demanda de produtos manufaturados.

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo de manejo e operação para o planejamento da colheita de estratos florestais segundo certos regimes de manejo, que são as formas de atuar nestes estratos.

A partir dos anos 60, muitos trabalhos importantes da área florestal foram apresentados nos Estados Unidos, envolvendo modelos de Programação Linear, associados a programas computacionais. Os programas mais importantes foram o Timber RAM (Resource Allocation Model), desenvolvido pela equipe do Dr. Navon do Serviço Florestal Americano em 1971, e o MAX-MILLION, desenvolvido na Universidade da Georgia, sob supervisão de Ware e Clutter, também em 1971. As estruturas matemáticas dos dois programas eram similares, apesar dos objetivos serem diferentes; o primeiro foi desenvolvido para uso no setor público florestal e o segundo para ser aplicado na indústria florestal. O modelo usado no Timber RAM gerou outros sistemas, tal como o FORPLAN (FOREst PLANning) desenvolvido pela equipe de Johnson, em 1980.

No Brasil, especificamente na área florestal, o uso da Pesquisa Operacional é um pouco mais recente, porém muitas aplicações já surgiram na literatura e em práticas florestais. Os modelos pioneiros foram os de planejamento do manejo e operação florestal, tais como, o sistema PLANFLOR desenvolvido por TAUBE NETTO (1984), para ser utilizado no

planejamento de plantações de *Eucalyptus* e o sistema PLANEPIISA desenvolvido por CARNIERI et al. (1991), para *Pinus*.

As atividades florestais, como as de manejo, são muito complexas e particulares, pois envolvem um produto que tem origem biológica e rotação de longo espectro. O mercado a longo prazo, pode alterar consideravelmente preços e demandas. Os custos inerentes ao manejo, também são suscetíveis a modificações. Planejamento é uma questão fundamental, pois decisões impróprias têm repercussões em escalas físicas e temporais imensas. Porém, o planejamento em si não tem valor se os dados que alimentam o modelo não representarem a realidade.

É comum o uso de modelos determinísticos de Programação Matemática, para auxiliar no planejamento de uma empresa florestal, porém a área florestal tem a particularidade de que várias das suas informações são amostrais e conseqüentemente são incertas, ou seja são quantidades que obedecem a equação  $y_i = \mu + \varepsilon_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $\mu$  é a parte sistemática e é avaliada de fato e  $\varepsilon_i$  é a componente estocástica, que entra como uma fonte de perturbação. Os gerentes florestais devem estar cientes do fato de que estão tomando decisões, usando resultados de um modelo de PL determinístico, alimentado por  $y_i = \mu$  ou por sua estimativa  $y_i = \hat{\mu}$ , através de uma simplificação do ambiente estocástico. Sabe-se que os valores estimados  $y_i = \hat{\mu}$  não têm necessariamente que ocorrer, isto é, alguma diferença é esperada devida à variabilidade natural ( $\varepsilon_i$ ) do ambiente florestal. Entretanto, o ponto estimado é tratado como um valor fixo, pois de fato ele é a melhor estimativa pontual que pode ser feita.

Existem muitos outros valores possíveis distribuídos em torno da média que poderiam ser usados e que também representariam a situação real. Por exemplo, tabelas de produção contêm um único valor que é usado para estimar a produção/ha de um estrato florestal para um

regime de manejo, em determinado ano. Como as tabelas não conseguem considerar todas as diferenças existentes de um estrato para outro, seus valores podem não representar o valor que realmente está ocorrendo no campo. Da mesma forma isto ocorre para as outras variáveis aleatórias usadas no modelo, como também para as informações de preços e custos.

Toda esta preocupação já está documentada na literatura florestal desde os anos 70; alguns enfoques já foram dados e muitas metodologias apresentadas. Nos modelos de Programação Linear, a maioria dos trabalhos focaliza a variabilidade dos dados apenas nos coeficientes da função objetivo e nos valores do vetor das demandas ou recursos. Os trabalhos que tratam da estocasticidade dos dados na matriz tecnológica não resolvem o modelo através das técnicas de Programação Linear, que tem a grande vantagem da aplicação do Simplex. Apesar desta preocupação, não havia muita forma de se fazer uma análise da influência da variabilidade dos dados, pois isto exigia condições computacionais diferentes das que até então existiam.

Com o avanço tecnológico, possibilitando o uso massificado de equipamentos computacionais com maior capacidade e velocidade, a utilização de modelos de Programação Linear tornou-se mais comum, devido justamente à possibilidade de resolver sistemas, com grande número de variáveis, que é o que se tem na realidade.

Outra área que ganhou impulso com os avanços computacionais, foi a da simulação, que depende fortemente da utilização destes equipamentos eletrônicos. O uso de simulação na área florestal pode ser visto em trabalhos, como por exemplo, no desenvolvimento de funções de crescimento e produção feitos por SANQUETTA (1994) em sua tese de doutorado.

A simulação é uma técnica usada para reproduzir o comportamento de um sistema e pode ser utilizada para representar a variabilidade da resposta do mesmo, quando os dados que alimentam o modelo não são conhecidos com certeza.

Não existem na literatura nacional florestal, trabalhos que usem técnicas de simulação acopladas a modelos de Programação Linear em Planejamento Florestal, apesar de haver citações em trabalhos quanto à preocupação do uso de informações amostrais esperadas nestes modelos.

Neste trabalho serão feitas simulações nas variáveis consideradas chaves, para o planejamento do manejo florestal, tais como os coeficientes de produção, os custos de manejo, os preços e as demandas dos produtos, em um modelo que usa Programação Linear, propiciando uma visão mais ampla dos possíveis valores que a receita líquida da empresa pode assumir.

Esta abordagem da tomada de decisões, amplia a informação do gerente, pois a resposta do sistema é dada através de uma distribuição de saídas da receita associado ao risco de obtê-la, em vez de um único valor.

Este trabalho parte do enfoque usual que se dá a um modelo de planejamento do manejo florestal, cujo objetivo é a otimização da escolha de regimes de manejos em estratos florestais, em um reflorestamento de *Pinus*, sendo sua solução obtida diretamente do uso do algoritmo Simplex. Otimizar é importante porque representa ganho econômico, social ou ambiental, dependendo do objetivo do empreendimento. Através da utilização de ferramentas de cinco áreas : Manejo Florestal, Matemática Aplicada, Estatística, Economia e Computação e dependendo do grau de variabilidade dos dados, propõe-se técnicas diferentes para se abordar a solução do modelo, seja através de uma simulação estocástica ou de cenários sistemáticos. Por cenários sistemáticos subentende-se cenários pré-definidos e que representem erros sistemáticos nas informações.

Será feita uma comparação entre os resultados de um modelo básico, que é um modelo convencional que não considera variações estocásticas nas variáveis, visando maximizar a



receita advinda do *Pinus* e seus produtos, e os obtidos pelas novas técnicas que incorporam a estocasticidade na análise na tomada de decisões. Também será avaliado o grau de risco que o responsável pelas decisões está sujeito em termos de resposta do sistema, através de um estudo de caso.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta tese é analisar e quantificar o impacto que informações estocásticas produzem em um modelo de Programação Linear, utilizado em um Planejamento Florestal.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese são os seguintes:

- Criar um modelo de Programação Linear de Planejamento Florestal para uma empresa do setor de papel e celulose, representativa da Região Sul, que envolva restrições de ordem técnicas e operacionais, com o objetivo de escolher o melhor regime de manejo para cada povoamento e que decida quais produtos produzir, a partir da matéria-prima existente, usando um critério econômico de decisão;
- Desenvolver um programa computacional, o mais flexível possível, para resolver o modelo de Programação Linear e a partir dele desenvolver um sistema computacional que aplique as técnicas de análise estocástica e represente cenários envolvendo erros sistemáticos nas informações, em função das variações introduzidas nas variáveis chaves do modelo;

- Apresentar técnicas adequadas para analisar o risco embutido nos resultados dos valores da Função Objetivo, dependendo do grau e da quantidade de informações sujeitas à incerteza.
- Fazer análise de risco em cada situação de variabilidade apresentada;
- Comparar as soluções encontradas pela análise estocástica, com a solução obtida através do procedimento usual, que usa os valores esperados das informações, com aplicação direta do Algoritmo Simplex;
- Discutir e concluir sobre as potencialidades de emprego da nova tecnologia gerada, na melhoria de tomadas de decisões em planejamento florestal.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCEITOS ECONÔMICOS E MATEMÁTICOS

#### 2.1.1 Empreendimento florestal. Retorno e risco.

O processo de planejamento em uma empresa é de fundamental importância. Pode-se afirmar que empreendimento e planejamento são conceitos que andam juntos, já que todo empreendimento requer no mínimo um planejamento, com objetivo econômico, ambiental ou social e que envolva as atividades a serem desenvolvidas e as disponibilidades de recursos físicos e financeiros, distribuídas ao longo de um certo período.

Na área florestal, devido à sua especificidade, confere-se ao planejamento grande importância, já que seus produtos são obtidos a médio e longo prazos. Muitos modelos de planejamento florestal já foram desenvolvidos e aplicados; alguns estão apresentados na literatura usando as mais diversas técnicas.

O procedimento geral de um planejamento florestal pode ser resumido em cinco passos:

1. Selecionar períodos de tempo, tanto para o horizonte de planejamento como para os períodos de planejamento das atividades. O horizonte de planejamento florestal, segundo WARE e CLUTTER (1971), deve ser no mínimo uma vez e meia a rotação usual considerada na análise; isto se deve às particularidades inerentes às espécies florestais que são de lento crescimento e cuja produção só ocorre após alguns anos de plantio.
2. Identificar as unidades de manejo, sendo que estas áreas podem manter sua identidade durante todo o planejamento.

3. Identificar os regimes de manejo. Um regime de manejo é formado por uma seqüência de atividades, durante todo período de planejamento.
4. Calcular custos de manejo para cada unidade de manejo e regime.
5. Definir um alvo para o planejamento, através de uma função objetivo, otimizando-a. Se não houverem restrições, simplesmente procura-se o melhor regime para cada unidade de manejo. Quando restrições existem, que é o que ocorre na maior parte dos casos, métodos da Programação Matemática podem ser usados para procurar a melhor decisão.

Quando o objetivo do planejamento for econômico, basicamente o investimento fundamenta-se em dois pontos: retorno financeiro e risco.

O retorno financeiro pode ser avaliado por vários critérios. Os mais empregados são: o valor líquido presente (*VLP*), a taxa interna de retorno (*TIR*) e a relação benefício/custo (*B/C*).

O modelo florestal que será apresentado, está associado a uma empresa do setor de papel e celulose e usa o critério do valor líquido presente geral, conforme descrito por BERGER (1985), que é o valor líquido presente de um conjunto infinito de rotações florestais, isto é, assume-se que a terra está voltada para a produção florestal e o que se procura maximizar é o resultado líquido de todas estas rotações.

Define-se o valor presente de um montante futuro como a quantia  $Q$  que seria equivalente hoje a um dado montante futuro  $Q_n$ , considerando o fato de que poder-se-ia obter um certo retorno (*juro*) sobre o investimento, isto é,  $Q = \frac{Q_n}{(1 + \textit{juro})^n}$ , onde *juro* é a taxa de retorno anual, custo de capital ou custo de oportunidade;  $n$  o número de anos considerados;  $Q_n$  o montante futuro e  $Q$  o valor presente ou atual.

Se do valor presente  $Q$  for deduzido o investimento inicial e o resultado for um valor positivo ou nulo, a empresa obterá um retorno maior ou igual que o inicial investido.

Mesmo quando o investimento tem um valor líquido presente positivo, existe um fator de risco ou incerteza associado ao investimento, que representa a possibilidade de perda do valor investido e mesmo do estimado para a receita final.

Define-se situação de risco quando, quem toma decisões pode estimar as probabilidades relativas a várias características e resultados. Dados históricos costumam definir distribuições de probabilidades exatas para certas variáveis. A incerteza ocorre quando quem toma decisões não tem nenhum dado histórico e precisa fazer estimativas aceitáveis, embora com amostras pequenas, tendo-se neste caso uma distribuição que pode ser aproximada.

São diversos os fatores, alguns fora de controle da administração da empresa, que provocam situações de risco e mesmo incertezas num investimento florestal. No modelo que será apresentado, os valores dos custos de manejo, dos preços dos produtos, dos coeficientes de produção, das demandas dos produtos e outros, precisam ser conhecidos para todos os períodos de planejamento. Estes dados podem se alterar durante o horizonte considerado ou já poderiam vir com erros, o que poderia provocar modificações no planejamento.

Segundo CHAVES NETO (1996), as causas de variabilidade de um processo qualquer, podem ser identificadas através de fatores particulares ou causas especiais de variação. Mesmo eliminando-se todos os fatores particulares, o processo ainda pode produzir variabilidade nas respostas. Isto ocorre devido à existência dos fatores inerentes ao processo, os quais não são identificáveis. Quando se elimina um a um, os fatores particulares de variação, aparece somente a variação aleatória causada pelos fatores inerentes ao processo. Neste caso, o processo estará sob controle e pode-se construir os limites de controle, que delimitam uma

região onde, com uma grande probabilidade o processo irá atuar. Esses limites determinam a capacidade do processo.

No caso do processo de um planejamento florestal, alguns desses fatores particulares poderiam ser:

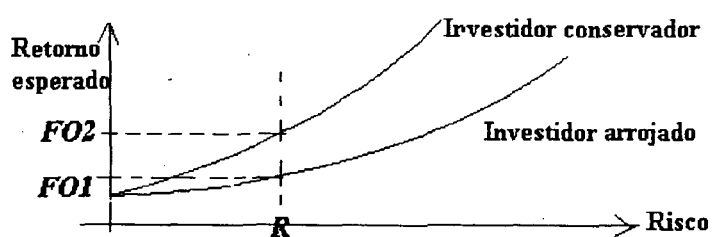
1. Modificação da tecnologia empregada , alterando custos.
2. A taxa de juro utilizada no planejamento.
3. Erros tendenciosos cometidos na obtenção dos coeficientes de produção devido a erros de medição ou ao sistema de classificação empregado, no sentido de que vários talhões são considerados homogêneos sem o ser exatamente. Esta hipótese da homogeneidade leva a uma escolha de valores médios de qualidade de sítio, idade e produtividade.
4. As atividades são desenvolvidas ao longo do período, os custos e as receitas são valores que ocorrem ao longo do tempo percorrido, dentro e entre períodos de corte. Porém este tempo é suposto pontual para cada período, quando podem haver variações.
5. Alterações da política da própria empresa, como por exemplo mudanças de produtos prioritários ou aumento do tamanho da planta industrial, alterando informações usadas no planejamento.
6. Surgimento de novos concorrentes ou o aparecimento de produtos complementares ou substitutos, alterando produtos comercializados como também demandas existentes.
7. O comportamento da economia nacional e internacional, alterando preços, custos e demandas.
8. Mudança de política governamental de controle de preços ou de custos de insumos utilizados, alterando preços e custos usados no planejamento.
9. Variações climáticas, incêndios, ataque de pragas, alterando os coeficientes de produção.

Os cinco primeiros são fatores internos à empresa, sobre os quais ela pode exercer influência e reduzir o risco. Os demais, em geral, estão fora de seu controle e aliado aos fatores inerentes ao sistema, representam fatores sérios de geração de risco.

A taxa de retorno pode ser diferente para diferentes períodos, de forma que ela aumente com o decorrer do tempo, durante o período de planejamento, representando o crescimento do risco.

A própria relação risco  $\times$  retorno pode ser considerada em vários níveis de exigência como mostra a Figura 01, onde observam-se investidores com diferentes preferências de risco. Para o mesmo risco  $R$ , o investidor conservador espera um retorno maior que o investidor arrojado, isto é,  $FO2 > FO1$ . O fato da função ser côncava, significa que todo investidor tem aversão ao risco, isto é, para cada aumento de risco exige-se uma compensação crescente em termos de retorno.

FIGURA 01: RELAÇÃO RISCO  $\times$  RETORNO



FONTE: SANVICENTE, A Z. Administração Financeira. 3. Ed., Ed. Atlas, 1991.

Segundo SMITH (1988), três enfoques de risco podem ser considerados num projeto:

1. Enfoque estatístico: analisa a natureza e o grau do risco e como isso se traduz nas respostas do sistema, usando ferramentas da estatística através do cálculo de probabilidades. Modelos

de simulação estocástica podem ser úteis; neste caso a resposta é uma função de valores aleatórios e ocorrerá segundo uma distribuição de probabilidades.

2. Enfoque econômico: analisa o tamanho do risco em relação ao tamanho do projeto em termos econômicos. Grandes investimentos requerem estudos mais aprofundados, além de se considerar o tipo de investidor que o responsável pelas decisões está incluído, se é arrojado, neutro ou conservador.
3. Enfoque político : analisa a complexidade da decisão após a análise da situação global, com as diferentes alternativas existentes.

O presente trabalho vai inicialmente preocupar-se com a avaliação estatística do risco e depois fazer uma análise mais geral da situação.

Na literatura econômica, tal como em GITMAN (1987) são sugeridas algumas formas de se avaliar estatisticamente o risco em um projeto:

1. Usar um único valor para alimentar cada informação do modelo, se houver certeza de que não há risco algum nisto.
2. Fazer análise de sensibilidade do projeto. Esta análise é feita considerando os possíveis retornos  $R$  para o pior caso, o caso esperado e o melhor caso. A partir destes valores calcula-se a faixa de variabilidade da resposta do projeto, que pode ser considerada uma medida básica do risco, associada ao projeto. Subtraindo-se do melhor valor o pior, obtém-se uma faixa  $F$  de valor  $F = R_{\text{melhor}} - R_{\text{pior}}$ .
3. Assumindo-se que  $R$  é uma variável aleatória, tem-se que o valor esperado de  $R$  é obtido por  $E(R) = \int_{\Omega} r \cdot f(r) dr$ , onde  $\Omega$  é o domínio de  $R$  e  $f(r)$  a sua função densidade de probabilidade. Particularmente na situação discreta onde se admite a existência do pior caso, do melhor caso e do caso padrão, com probabilidades conhecidas, tem-se:



$E(R) = \sum_i R_i \cdot P(R = R_i)$ , ou ainda  $E(R) = p_1 \cdot R_{\text{pior}} + p_2 \cdot R_{\text{esperado}} + p_3 \cdot R_{\text{melhor}}$ , com

$p_i = P(R=R_i)$ . O valor esperado  $E(R)$  oferece um indicativo do retorno provável, se o planejamento conhece a distribuição de probabilidades de  $R$ . Estes valores costumam ser avaliados de forma pouco precisa e juntamente com a faixa  $F$  fornece ao gerente de decisões alguma informação de risco.

4. A estimativa do valor esperado de  $R$  ou a análise de sensibilidade fornece ao responsável pelas decisões mais informações do que um único valor (como quando se usa valores esperados dos dados), mas ainda não dá um quadro muito nítido do risco.

Uma distribuição probabilística discreta pode ser obtida considerando-se faixas de variação para o retorno e a frequência com que acontecem. Um gráfico de barras pode mostrar estas informações. Caso não seja feita esta discretização e tendo-se em vista a natureza da característica observada, pode-se ajustar uma distribuição probabilística contínua.

A medida estatística mais comum de um risco é dada pelo desvio padrão, definido pela raiz quadrada da variância da variável aleatória  $Y$ , isto é,  $\sigma_Y = \sqrt{V(Y)}$ , onde:

$$V(Y) = E(Y - \mu_Y)^2 = \int_{\Omega} (y - \mu_Y)^2 \cdot f(y) dy, \text{ sendo } \mu_Y = E(Y) \text{ e } f(y) \text{ a função densidade de}$$

probabilidade da variável aleatória  $Y$ .

Quando a variável aleatória é discreta, a integral é substituída pelo somatório, no domínio  $\Omega$  de  $Y$ . Os estimadores ótimos desses parâmetros (média e desvio padrão) são:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \text{ para } \mu_Y \quad \text{e} \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \text{ para } \sigma_Y^2, \text{ obtidos a partir de uma}$$

amostra aleatória  $[Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$ .

A avaliação do risco também pode ser feita através do coeficiente de variação ( $CV$ ) da distribuição dos resultados, onde  $CV = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y}$ . O  $CV$  tem a vantagem de caracterizar a dispersão dos dados em termos relativos ao seu valor médio. Além disso, fornece uma maneira de se comparar as dispersões de variáveis que possuem unidades diferentes.

### 2.1.2 Programação Matemática

Define-se Programação Matemática como sendo a área da Pesquisa Operacional que trabalha com um conjunto de técnicas e algoritmos específicos que alocam recursos para otimizar um objetivo particular.

Conforme apresentado por LEUSCHNER (1984) e de acordo com a ferramenta matemática utilizada para se obter o objetivo, a Programação Matemática é dividida em áreas, tais como:

- Programação Linear
- Programação Inteira
- Programação Não - Linear
- Programação Dinâmica
- Análise de Redes
- Processos de Markov
- Teoria de Filas
- Modelos de Inventário
- Simulação.

#### Programação Linear

A Programação Linear ( PL ) é uma das técnicas mais usadas da Pesquisa Operacional, com aplicações importantes na área florestal. Isto se deve a várias razões, sendo que a

principal é que muitos problemas podem ser modelados através de funções lineares. Além do mais, o algoritmo Simplex que resolve tais modelos é amplamente conhecido e os modelos que usam PL podem trabalhar com muitas informações ao mesmo tempo, sem que se explicita todas as possibilidades de soluções para se escolher a melhor. Uma análise de sensibilidade pode ser efetuada, como também podem ser utilizadas muitas outras técnicas especiais derivadas do Simplex, tais como o Simplex Revisado, a Programação Paramétrica e o método GUB (Generalized Upper Boundings).

Um problema de Programação Linear tem as seguintes características:

1. Um critério de escolha das variáveis de decisão formado por uma função linear das variáveis, chamada de Função Objetivo (*FO*), cujo valor deve ser otimizado.
2. As relações de interdependência entre as variáveis de decisão se expressam por um conjunto de equações ou inequações lineares, chamadas de restrições do modelo.
3. As variáveis de decisão são positivas ou nulas.

Matematicamente sempre pode-se representar um modelo de PL na forma matricial:

$$\begin{aligned} \max z &= c^T \cdot x \\ A \cdot x &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

sendo  $z$ : Função Objetivo *FO*;

$c$ : vetor de lucros de dimensão  $n \times 1$ ;

$c^T$ : vetor transposto do vetor  $c$ , de dimensão  $1 \times n$ ;

$x$ : vetor das variáveis de decisão de dimensão  $n \times 1$ ;

$A$ : matriz tecnológica de dimensão  $m \times n$ ;

$b$ : vetor dos recursos de ordem  $m \times 1$ .

O sistema de equações ( S )  $A \cdot x = b$  representa as restrições do modelo.

Basicamente o modelo de PL vai selecionar a melhor alternativa, entre uma lista de possibilidades, que satisfaz um conjunto de restrições e otimiza o objetivo.

O planejamento da colheita de madeira é um dos pontos críticos do planejamento florestal. Quando existem muitas opções de regimes de manejo para cada estrato e muitas restrições associadas, escolher o plano ótimo ou quase ótimo pode ser muito trabalhoso e as vezes ineficiente quando são usados apenas os métodos tradicionais, tais como, experiências anteriores, tabelas de produção, entre outros.

A solução de um modelo de PL pode ser interpretada como sendo a melhor escolha entre vários empreendimentos possíveis, sendo que cada um é representado por uma escolha particular de regimes para cada estrato considerado. Geometricamente cada empreendimento é um vértice do politopo, representando o conjunto de soluções factíveis do modelo de Programação Linear.

Representando por  $I_0$  o investimento inicial do empreendimento, sejam:

*Empreendimento 1*: escolha 1, de estratos e de regimes de manejo, atendendo às restrições;

*Empreendimento 2*: escolha 2, de estratos e de regimes de manejo, atendendo às restrições;

*Empreendimento E*: escolha E, de estratos e de regimes de manejo, atendendo às restrições.

Existe um número muito grande de possibilidades ou de empreendimentos, que é dado por  $C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}$ , onde  $n$  é o número de variáveis da matriz tecnológica  $A$  e  $m$  o número de restrições do modelo. O PL escolhe o empreendimento com o máximo valor líquido presente (se este for o critério econômico escolhido para definir a função objetivo) calculando  $R = \max_i \{VLP(\text{Empreendimento } i)\}$ . Se  $R - I_0 \geq 0$ , diz-se que o empreendimento é rentável.

Entre as opções oferecidas, uma seria ‘abandonar’ tudo e com o investimento inicial  $I_0$  atender às demandas obrigatórias através de compras dos produtos necessários.

Em relação as outras áreas da Programação Matemática:

Quando não se pode representar a função objetivo ou o sistema (S) através de funções lineares tem-se que usar a Programação Não-Linear ( PNL ).

Se no modelo de Programação Linear as variáveis só podem assumir valores inteiros devem-se usar as técnicas da Programação Inteira ( PI ).

Quando os dados ou as variáveis não são determinísticas, a Programação Estocástica foi desenvolvida para tratar destas situações.

A Programação Dinâmica é usada em situações que admitem um processo recursivo, onde definem-se estágios e estados, sendo que decisões são tomadas em função dos estados.

A Análise de Redes trata de problemas que usam malhas e procura a melhor rota, através de um sistema de arcos que são conectadas por nós. Problemas de transporte e designação estão incluídos nesta área.

Processo de Markov é um tipo de processo estocástico que analisa a evolução de um sistema de um estado para outro com base nas probabilidades para evoluir, arranjadas numa matriz de transição. Este processo é aplicado de forma variada, desde a evolução de peixes numa lagoa até o reconhecimento de caracteres.

A Teoria de Filas examina a chegada de itens em um servidor e analisa as razões para congestionamento e demora.

Modelos de inventário pertencem a uma classe específica de modelos que examinam o fluxo de itens que ocorrem num inventário.

Os Modelos de Simulação são bastante utilizados na área florestal como técnica de otimização, conforme apresentado por SANQUETTA (1996).

### Modelos de Simulação

O significado usual dos modelos de simulação é o de que seja um procedimento computacional baseado num sistema real através de relações lógicas e matemáticas. Este modelo é então usado para fazer experimentações ou executar cenários. Os resultados gerados destas execuções são analisados e conclusões podem ser obtidas para o sistema real.

As experimentações podem usar a Técnica de Monte Carlo, que as vezes é usada como sinônimo para a própria simulação. Define-se Monte Carlo como sendo o conjunto das técnicas computacionais em que se geram amostras de acordo com determinadas distribuições teóricas conhecidas, visando estudar novos procedimentos ou experimentos.

O diagrama apresentado na Figura 02, descreve o processo de relacionamento entre a modelagem e a simulação.

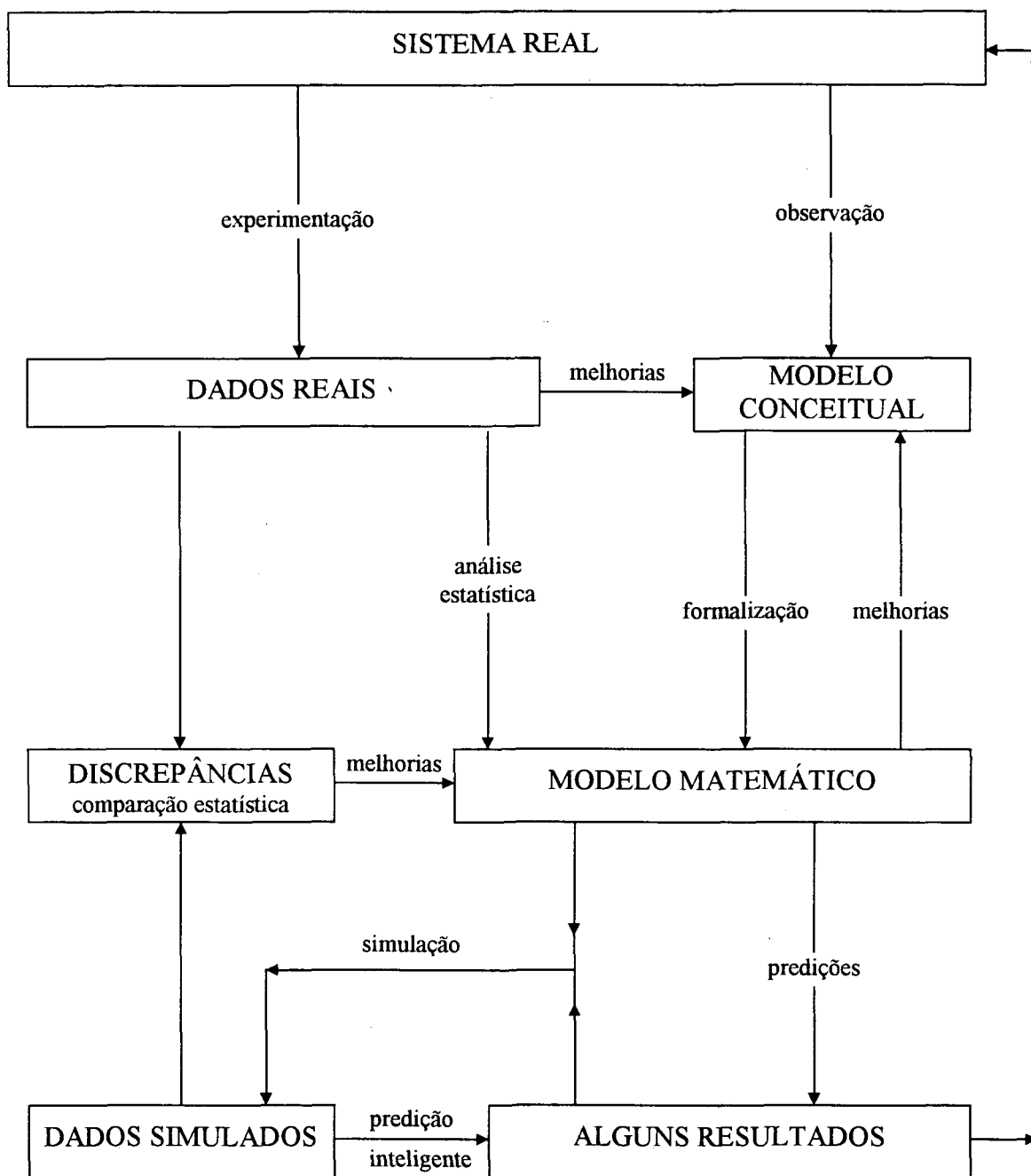
Dois tipos de informações podem ser obtidas das simulações:

1. A informação de como o sistema real comporta-se sem ter que testá-lo em situações reais.
2. Uma estimativa dos valores das variáveis que irão otimizar o sistema real.

Existem linguagens próprias para desenvolver programas de simulação, porém eles podem ser preparados em qualquer linguagem, tal como o FORTRAN. Tais programas devem conter geradores de números randômicos, variáveis estocásticas e algum tipo de processo que represente o escoamento do tempo.

O presente trabalho, com a finalidade de fazer um estudo sobre a variabilidade dos dados em um modelo de planejamento florestal, usa duas das técnicas da Programação Matemática acima descritas, a Programação Linear e a Simulação.

FIGURA 02: MODELAGEM X SIMULAÇÃO



FONTE: Diagrama de GÉRARDIN, L. (1968). BIONICS. New York. Mc. Graw Hill Book Co. Citado por SPAIN (1982)

## 2.2 HISTÓRICO DOS MODELOS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

Na monografia publicada pelo periódico *Forest Science*, por JOHNSON e SCHEURMAN (1977), são descritos dois modelos básicos de Programação Linear para otimizar a colheita de madeira e o investimento, ao longo de um período de planejamento. Este documento é considerado fundamental para quem trabalha nesta área.

A diferença básica entre os dois modelos, chamados de Modelo I e Modelo II, é na definição de atividade.

No modelo I uma atividade é representada pelas ações tomadas sobre unidades de manejo durante o horizonte de planejamento. No modelo II, uma atividade é representada pelas ações que atuam sobre uma classe de idade existente durante o horizonte de planejamento.

No modelo I são definidas as unidades e regimes de manejo. Então, se  $x_{ij}$  representa o número de hectares da unidade de manejo  $i$  sujeita ao regime  $j$ , o modelo I pode ser representado da forma:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR_i} c_{ij} x_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{j=1}^{NR_i} x_{ij} = AREA_i, \quad i = 1, \dots, NE \\ & x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

onde  $NE$ : número de unidades de manejo;

$NR_i$ : número de regimes de manejos associados à unidade de manejo  $i$ ;

$AREA_i$ : área do estrato  $i$ ;

$c_{ij}$ : valor líquido presente da receita por ha, da unidade  $i$  manejada pelo regime  $j$ .



No modelo II,  $x_{ij}$  representa o número de hectares que são plantados no período  $i$  e cortados no período  $j$  e  $w_{iH}$  o que foi plantado no período  $i$  e deixado para o inventário final no período  $H$ . Uma atividade refere-se a um conjunto de ações que podem ocorrer numa determinada área desde seu plantio até seu corte raso ou inventário final.

Matematicamente o modelo II pode ser representado da forma:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{j=1}^H \sum_{i=-M}^{j-Z} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=-M}^H d_{iH} w_{iH} \\
 \text{s.a.} \quad & \sum_{j=1}^H x_{ij} + w_{iH} = \text{AREA}_i, \quad i = -M, \dots, 0 \\
 & \sum_{k=j+Z}^H x_{jk} + w_{jH} = \sum_{i=-M}^{j-Z} x_{ij} \\
 & x_{ij} \geq 0, \quad w_{iH} \geq 0.
 \end{aligned}$$

Neste modelo  $M$  representa o número de períodos antes do período zero de planejamento, no qual a área mais velha foi implantada;  $H$  o período final de planejamento,  $Z$  o número mínimo de períodos entre desbastes;  $c_{ij}$  o custo de manejar um hectare dos estratos plantados no período  $i$  e cortados no período  $j$ ;  $d_{iH}$  o custo/ha do manejo dos estratos plantados no período  $i$  e deixados para o período final  $H$ . As áreas não são mantidas intactas durante todo o período de planejamento, o que não acontece no modelo I, permitindo que as mesmas sejam combinadas ou divididas para aplicar um novo regime de manejo.

Sob ponto de vista prático, o modelo I permite identificar, de fato, a área manejada na floresta, porém no modelo II como se está trabalhando com classes de idade é mais difícil identificar no solo a área que se está manejando, durante o período de planejamento.

Muitas aplicações foram geradas dos conceitos estabelecidos nesta monografia. Entre os mais importantes podemos citar o trabalho de BARROS e WEINTRAUB (1982) que usa o modelo I para desenvolver um sistema de planejamento para uma indústria florestal integrada

verticalmente, cujo manejo das áreas florestais deve suprir de madeira a planta industrial e a serraria. O modelo é bastante completo, pois considera os aspectos tecnológicos, geográficos, silviculturais e econômicos.

Outro sistema também gerado dos conceitos da monografia e amplamente usado é o FORPLAN ( FORest PLANing ), um marco em termos de programa computacional.

O sistema FORPLAN, nas suas duas versões desenvolvidas por JOHNSON (1986) e JOHNSON et al.(1986), foi acompanhado pelo Serviço Florestal Americano (USDA - United States Department of Agriculture), visando atender várias situações de planejamento das florestas nacionais americanas.

FORPLAN é usado para construir a matriz tecnológica do modelo de PL que represente o modelo de planejamento em questão, fornecendo uma série de saídas impressas obtidas após a resolução do modelo de PL. A solução do modelo de PL pode ser encontrada usando-se qualquer outro pacote computacional de PL.

Este sistema ainda é utilizado apesar das críticas surgidas ao longo do tempo. Pode-se citar os documentos de DE ANGELIS (1986), BARE e FIELD (1986) e DYKSTRA (1986) que fazem uma avaliação do FORPLAN do ponto de vista de sua adequação como modelo e sua operacionalização. Versões mais modernas tentaram melhorar a performance do pacote computacional.

Trabalhos mais recentes, como os de CARNIERI (1989) e CARNIERI et al.(1991), utilizam o modelo I descrito por Johnson, para fazer um planejamento florestal.

SCOLFORO (1990) em sua tese de doutorado, baseou-se no mesmo modelo para desenvolver um sistema integrado para análise de crescimento e produção para *Pinus* com otimização de remuneração de capitais.

RODRIGUEZ et al. (1989) apresentaram um sistema de gerenciamento de florestas de *Eucalyptus* usando um modelo de Programação Linear do tipo I .

Os dados usados nos modelos citados, particularmente os coeficientes de produção são considerados determinísticos. Na realidade, a obtenção destes dados está sujeita à amostragem e a erros de medição e, as vezes, a qualidade destas informações é desconhecida. Outros dados, como preços, custos, demandas, dependem de eventos futuros. Tudo isto pode produzir desvios do valor esperado e a análise dos resultados pode ser inválida, se os dados estimados forem significativamente diferentes dos valores que realmente estão ocorrendo no campo ou vão ocorrer durante a implantação dos resultados obtidos da execução do modelo.

Para poder considerar estes desvios, outras técnicas podem ser acrescentadas ao método tradicional de PL, como por exemplo, a análise de sensibilidade, a análise paramétrica e a análise de cenários extremos.

Segundo WEINTRAUB e ABRAMOVICH (1995), isto pode ser feito sem problemas se a quantidade de dados afetadas por aleatoriedade for relativamente pequena ou se as situações incertas podem ser descritas apenas por poucos cenários.

A prática de se usar valores esperados é comum e em alguns casos não envolve riscos nos resultados finais. Porém, os gerentes florestais devem estar preparados para a possibilidade de risco que pode haver quando se trabalha com estimativas dos valores esperados em modelos determinísticos, representando ambientes estocásticos.

Esta preocupação já existia desde que procurou-se sistematizar o gerenciamento florestal, como se observa em trabalhos publicados nos anos 70 (por exemplo, THOMPSON e HAYNES (1970) ).

Em modelos florestais de PL são necessárias algumas informações obtidas de ambientes estocásticos ou futuros, entre outros:

1. demandas dos produtos considerados ao longo de todo período de planejamento;
2. coeficientes de produção;
3. custos de manejo;
4. preços de produtos comercializados ao longo de todo o período de planejamento.

Pela disposição destas informações no modelo, pode ocorrer interferência na formulação da função objetivo  $FO$ , no vetor dos recursos  $b$  ou  $RHS$  ou na matriz tecnológica  $A$ , conforme a representação de um modelo qualquer de PL na forma matricial.

Coefficientes de produção estocásticos geram matriz tecnológica e função objetivo estocásticas. Preços e custos estocásticos, em geral, só interferem na função objetivo. Demandas estocásticas interferem no vetor dos recursos  $RHS$ .

Segundo WEINTRAUB e ABRAMOVICH (1995), se a aleatoriedade ocorre no  $RHS$  ou nos coeficientes da  $FO$ , o enfoque paramétrico pode ser útil para explorar soluções para diferentes cenários. Porém PICKENS e DRESS (1988) já alertavam que este método não é efetivo quando a aleatoriedade está presente em problemas de grande escala, principalmente nos coeficientes de produção embutidos na matriz tecnológica.

Quando a matriz tecnológica contém dados estocásticos, aparecem na literatura, duas maneiras principais de atacar o problema:

1. Embutir a estocasticidade no modelo, mas ainda resolvê-lo através de PL.
2. Usar o conceito de restrições probabilísticas, isto é, as restrições do PL são satisfeitas com uma certa probabilidade, sendo necessário usar métodos da PNL para resolver o modelo.

O problema de considerar situações estocásticas explicitamente, aparece na literatura, numa das primeiras publicações, por THOMPSON e HAYNES (1970). Nesta publicação aborda-se a questão da incerteza na tomada de decisões. Fala-se sobre “... o uso de modelos de decisão determinísticos em ambiente não-determinístico, envolvendo custos, preços,

produções, tecnologia e mercados futuros”. É proposto substituir estimativas pontuais das disponibilidades do *RHS* por variáveis randômicas e o resultado é representado por uma distribuição de soluções descrita pela sua média e variância. Este documento trabalha apenas com *RHS* estocástico, sendo que a matriz tecnológica e os coeficientes da *FO* são determinísticos.

Já no trabalho de PICKENS e DRESS (1988), faz-se uma análise da influência dos coeficientes de produção estocásticos nos resultados da *FO*, na factibilidade e nas atividades duais. Duas estruturas de modelos foram testadas naquele trabalho: modelos irrestritos e modelos restritos. Chamou-se modelos irrestritos aqueles que só consideraram restrições de área. Os coeficientes de produção foram perturbados por diferentes distribuições de probabilidade e vários graus de variabilidade, através da normal, Cauchy e exponencial dupla com coeficientes de variação *CV* de 10, 30 e 50%. Nos modelos restritos, outros tipos de restrições foram considerados, porém só foi usado a distribuição normal com *CV*=10% para teste.

Em cada simulação duas variáveis aleatórias foram observadas:  $FO_{pert}$  e  $FO_{true}$  onde  $FO_{pert}$  representa o retorno financeiro quando coeficientes estocásticos são usados e  $FO_{true}$  representa o retorno financeiro esperado quando a solução ótima do problema perturbado é implementada. Comparações são feitas com o valor de  $FO_{bas}$  que representa o retorno quando a informação perfeita está disponível. Considera-se o valor esperado como a informação perfeita.

Mais duas outras variáveis aleatórias são analisadas: tendência *B*, calculada por  $B=FO_{pert} - FO_{true}$ , representando o quanto o retorno é desviado da verdadeira resposta do sistema; e perda *L*, calculada por  $L=FO_{bas} - FO_{true}$  que representa o ganho potencial esperado se a informação perfeita estivesse disponível.

Nos modelos irrestritos, as conclusões mais importantes foram:

1.  $B > 0$ ;
2.  $FO_{pert} > FO_{bas}$  e  $FO_{bas} > FO_{true}$ ;
3.  $B$  e  $FO_{pert}$  têm distribuição normal, porém  $FO_{true}$  não.

Em modelos restritos, dois tipos de restrições foram consideradas: restrições que não dependem dos coeficientes de produção e restrições que dependem dos mesmos.

Na 1ª situação os resultados são similares ao caso irrestrito.

Na 2ª situação, verificaram-se os resultados:

1.  $B > 0$ ;
2.  $FO_{pert} > FO_{bas}$ ;
3.  $B$ ,  $FO_{pert}$ ,  $FO_{true}$ , todos têm distribuição normal.

Como a factibilidade não é mais garantida no caso em que a solução ótima do  $PL_{pert}$  é implementada no  $PL_{bas}$ , que é o correto, concluiu-se que o valor de  $FO_{bas}$  não é necessariamente maior ou igual que  $FO_{true}$ ; além do mais esta resposta passa também a ter uma distribuição normal como as outras analisadas.

No trabalho de HOF, ROBINSON e BETTERS (1988), faz-se um estudo de várias situações que podem ocorrer quando têm-se dados estocásticos e valores esperados são usados. A discussão está fundamentada em dois teoremas apresentados por WAGNER (1986), os quais são:

#### 1. Falácia das Médias:

Dada uma função qualquer não-linear  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  onde  $x_1, \dots, x_n$  são variáveis aleatórias é usualmente errado assumir que  $E(f(x_1, x_2, \dots, x_n)) = f(E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n))$ , onde  $E$  é o valor

esperado. Como caso particular, seja a função  $f$  definida por  $f(c_1, \dots, c_n) = \max \sum_{j=1}^M c_j x_j$

com as restrições  $\sum_{j=1}^M a_{ij}x_j = b_j$ ,  $i = 1, \dots, N$ ,  $x_j \geq 0$ . Neste caso a função  $f$  não é

linear e não podemos afirmar que  $E(\max_{j=1}^M c_j x_j) = \max_{j=1}^M E(c_j) \cdot x_j$ .

## 2. Teorema da Equivalência Linear:

Assumindo que  $a_{ij}$  e  $b_j$  são conhecidos e que  $c_j$  são variáveis aleatórias independentes de  $x_j$ ,

então a solução de  $\max E(\sum_{j=1}^M c_j x_j)$  sujeito às restrições

$\sum_{j=1}^M a_{ij}x_j = b_j$ ,  $i = 1, \dots, N$ ,  $x_j \geq 0$ , é dada pelos valores de  $x_j$  tal que satisfazem o

$\max \sum_{j=1}^M E(c_j)x_j$  sujeito às mesmas restrições. Isto quer dizer que se a parte randômica

estiver só na  $FO$ , então podemos afirmar que  $\max E(\sum_{j=1}^M c_j x_j) = \max \sum_{j=1}^M E(c_j) \cdot x_j$ , porém

este valor não é necessariamente igual a  $E(\max_{j=1}^M c_j x_j)$ .

Duas situações foram analisadas: quando só restrições de área são incluídas e quando restrições de área e de produções são incluídas.

No primeiro caso, quando só se usam as restrições de área, os coeficientes de produção só entram na  $FO$ . Então com apenas valores de  $c$  estocástico, ter-se-iam vários problemas de PL, como a seguir:

$$PL_1: Z_1 = \max \sum_{j=1}^M c_j x_j \quad s.a. \quad A \cdot x = b, \quad x \geq 0.$$

$PL_1$  admite uma distribuição de soluções para  $x^l$  e  $Z_l$ , uma solução para cada  $c$ .

$$\text{PL}_2: Z_2 = \max E\left(\sum_{j=1}^M c_j x_j\right) \text{ s.a. } A.x = b, \quad x \geq 0.$$

$\text{PL}_2$  admite uma solução  $x^2$  e  $Z_2$  para o valor ótimo.

$$\text{PL}_3: Z_3 = \max \sum_{j=1}^M E(c_j) \cdot x_j \text{ s.a. } A.x = b, \quad x \geq 0.$$

$\text{PL}_3$  admite uma solução  $x^3$  e  $Z_3$  para o valor ótimo. Pelo Teorema da Equivalência Linear, tem-se que  $x^2 = x^3$  e  $Z_2 = Z_3$ .

$$\text{PL}_4: Z_4 = E\left(\max \sum_{j=1}^M c_j \cdot x_j\right) \text{ s.a. } A.x = b, \quad x \geq 0.$$

Este PL admite uma solução  $x^4$ , que não está associada a nenhuma solução anterior como por exemplo ao valor esperado da distribuição de  $x^l$ ,  $E(x^l)$ .

O  $\text{PL}_1$  é o que normalmente tem-se como situação real. O  $\text{PL}_3$  é como normalmente ele é resolvido e o  $\text{PL}_4$  é como se gostaria de ter resolvido o  $\text{PL}_1$ . Porém pelo Teorema 1, a

Falácia das Médias, não se pode garantir que  $\max E\left(\sum_{j=1}^M c_j x_j\right) = E\left(\max \sum_{j=1}^M c_j x_j\right)$ , isto é,

$\max E(\pi) \neq E(\max \pi)$ , em geral, sendo  $\pi = \sum_{j=1}^M c_j x_j$ . Se isto fosse verdade, o uso de valores

esperados nos coeficientes da  $FO$ , garantiria que a solução encontrada seria o valor esperado de todas as soluções obtidas para  $c$  estocástico.

Quando a aleatoriedade ocorre também nas restrições, a situação é mais grave, no sentido de que é difícil encontrar uma solução factível para todas as matrizes  $A$ 's estocásticas.

Se o PL é da forma:



$$\text{PL}_5: Z_5 = \max \sum_{j=1}^M c_j x_j \quad \text{sujeito a } A \cdot x = b, A \text{ estocástica, } x \geq 0.$$

Então para cada matriz  $A$  tem-se uma solução  $x$  e um valor para  $Z_5$ . Este PL admite uma distribuição de soluções  $x^5$  e valores  $Z_5$ .

$$\text{PL}_6: Z_6 = \max E\left(\sum_{j=1}^M c_j x_j\right) \quad \text{sujeito a } A \cdot x = b, A \text{ estocástica, } x \geq 0.$$

Este PL é indeterminado no sentido que não se pode encontrar uma única solução  $x^6$  que satisfaça qualquer conjunto  $A \cdot x = b$ , com  $A$  estocástico e que gere o  $\max E(c \cdot x)$ .

$$\text{PL}_7: Z_7 = E\left(\max \sum_{j=1}^M c_j x_j\right) \quad \text{sujeito a } A \cdot x = b, A \text{ estocástica, } x \geq 0.$$

Este PL fornece um único valor para  $Z$  que é dado pelo valor esperado das soluções dos PL's para  $A$  estocástico. Porém a questão da infactibilidade ainda existe. Qual seria a solução do PL?

A prática corrente de usar as estimativas dos valores esperados para as variáveis, pode gerar aproximações para  $E(\max \pi)$ , porém pode levar a soluções que possuem baixa probabilidade de serem factíveis.

O usual é trabalhar com as estimativas dos valores esperados das variáveis, na *FO*, na matriz  $A$  e no vetor de recursos, como no PL:

$$\text{PL}_8: Z_8 = \max \sum_{j=1}^M E(c_j) x_j \quad \text{s.a. } E(A) \cdot x = E(b), \quad x \geq 0.$$

Considerando-se que as estimativas dos valores esperados sejam a informação perfeita e usando-se os valores perturbados segundo alguma distribuição em torno desta média, pode-se analisar como os valores de  $x$  e de  $Z$  alterariam e qual seria o risco, em função de onde foi feita a perturbação e do grau da perturbação.

No ano de 1988, em Asilomar, California, durante o Simpósio em Análise de Sistemas em Recursos Florestais, foi apresentado por PICKENS e HOF (1988), uma análise dos dois últimos trabalhos acima citados. Ambos, através de diferentes enfoques avaliam o impacto que coeficientes de produção estocásticos imprimem em problemas de PL de alocação de áreas.

Apesar de serem estudos independentes, as conclusões a que ambos chegaram foram comuns:

1. Um PL com coeficientes de produção estocásticos dificilmente encontra uma solução factível, da maneira como eles são tipicamente resolvidos.
2. Muito cuidado é necessário quando PL é usado em ambientes incertos.

As idéias de restrições probabilísticas são apresentadas nos artigos de HOF e PICKENS (1991) e HOF, KENT e PICKENS (1992) . A dificuldade da aplicação deste enfoque é que tem que ser usados algoritmos da Programação Não-Linear para resolver o novo modelo.

No trabalho de EID (1993) é apresentada uma discussão sobre os efeitos nas variáveis de decisão de um modelo de planejamento florestal para variações aleatórias nas variáveis índice de sítio, área basal e altura dominante. Observa-se aqui que, em vez de aleatorizar os coeficientes de produção, Eid trabalha com as variáveis das quais os coeficientes são dependentes. As conclusões são muito similares aos trabalhos anteriores.

Durante estes últimos anos, estes assuntos ainda têm recebido contínua atenção. Para citar trabalhos mais recentes, WEINTRAUB e ABRAMOVICH (1995), propõem uma formulação de restrições com probabilidades para produções incertas, incorporando esta incerteza no processo de decisão. Fazem também uma comparação entre o modelo sendo resolvido da forma convencional, na formulação PL com coeficientes esperados e o novo algoritmo.

Nesta mesma época um outro enfoque pragmático foi desenvolvido por HOF, BEVERS e PICKENS (1995), evitando métodos não-lineares para se obter a solução do modelo.

No trabalho recente de PUKKALA e KANGAS (1996), é apresentado um método para incorporar risco e atitude perante o risco em planejamento florestal, usando as distribuições das variáveis de decisão.

Pelos trabalhos citados, observa-se que existe muita preocupação em relação à variabilidade dos dados de produção e que muito ainda está por se estudar e analisar. Na literatura brasileira, poucos estudos são encontrados envolvendo análises de variabilidades dos dados de entrada em modelos de Programação Linear.

Nos trabalhos de tese desenvolvidos por SCOLFORO (1990) e AREHNS (1992), são feitos comentários e recomendados realizações de pesquisas no desenvolvimento de modelos de otimização que incorpore uma análise estocástica.

NEWNHAM (1975), citado por SCOLFORO (1990) em sua tese, discute a aceitação da Programação Linear como um método determinístico, quando uma quantidade considerável de incertezas são envolvidas nos problemas de planejamento florestal. Ainda diz que, embora com críticas, o uso de PL é amplo.

Segundo AHRENS (1992), “ ... o caráter determinístico das equações e 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 da madeira, como das informações relativas aos custos de produção e dos preços associados às diferentes classes de matéria-prima produzida.”

A proposta deste trabalho é fazer uma análise da questão, para uma situação regional, envolvendo as dificuldades que podem ocorrer quando os dados são incertos, procurando quantificar esta variabilidade.

Primeiramente será desenvolvido um modelo de planejamento florestal e um programa computacional para resolvê-lo.

A seguir propõe-se fazer uma análise global da influência que as variáveis aleatórias podem ter sobre as respostas do sistema em relação aos valores da receita líquida dados por *FO* e propor uma metodologia de análise de risco do empreendimento florestal .

Dependendo do grau e do tipo de variabilidade das informações do modelo serão consideradas:

1. **Simulações estocásticas**, onde dados serão gerados aleatoriamente e o sistema fornecerá múltiplas respostas, isto é, em vez de uma única resposta determinística, tem-se uma distribuição de soluções.
2. **Cenários sistemáticos**, quando se está interessado nos limites máximos e mínimos de variabilidade ou em algum cenário em particular, como por exemplo, quando as informações chaves do modelo contêm erros sistemáticos de medição.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

##### 3.1.1 Introdução

O planejamento florestal que será considerado se refere a uma empresa florestal que atua no setor de papel e que possui plantações de *Pinus taeda* e *elliottii*, podados e não-podados, entre outras. A empresa supre sua demanda, como também pode vender seus produtos em caso de folga de produção. Na falta de madeira para processo (polpa celulósica), esta pode ser adquirida através de compra de terceiros ou por arrendamento.

O modelo apresentado a seguir é um modelo de Programação Linear que procura o melhor regime de manejo para cada estrato, de forma a maximizar o valor líquido presente geral da renda da empresa.

As restrições que serão consideradas são:

- restrições de área;
- restrições de compra de madeira para processo em todos os períodos;
- restrições de demanda de cada produto considerado em todos os períodos;
- restrições de volume máximo desbastado nos primeiros períodos de planejamento.

##### 3.1.2 Restrições

Cada tipo de restrição considerada no modelo será descrita e representada matematicamente através de equações ou inequações lineares.

### 3.1.2.1 Restrições de área

O estrato será definido por homogeneidade de espécie, idade, distância ao centro de operações, índice de sítio e se foi podado ou não.

Representando por  $i$  o estrato,  $j$  o regime de manejo associado ao estrato  $i$ ,  $NE$  o número total de estratos,  $NR$  o número máximo de regimes associados ao estrato  $i$  e  $x_{ij}$  o número de hectares do estrato  $i$ , manejado segundo o regime  $j$ , então:

( 1 )  $x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iNR} \leq AREA_i, \quad \forall i = 1, \dots, NE$ , onde  $AREA_i$  é a área em hectares do estrato  $i$ . Considerando que parte ou toda área do estrato  $i$  não precisa ser explorada, podendo ser abandonada, a equação ( 1 ) pode ser reescrita da forma:

( 2 )  $x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iNR} + FA_i = AREA_i, \quad \forall i = 1, \dots, NE$ , onde  $FA_i$  representa a folga da área  $i$ , isto é, a área do estrato  $i$  que não foi manejada segundo algum regime de manejo, sendo deixada como estava no início do planejamento.

### 3.1.2.2 Restrições de compra de madeira para processo

Eventualmente, durante qualquer período de planejamento, representado por  $k$ , a madeira a ser utilizada na produção de papel pode ser adquirida de outros, porém até um certo volume máximo que é definido pela empresa. Estas restrições são representadas por:

( 3 )  $CMP_k \leq VMCP_k, \quad \forall k = 1, \dots, PP$ , onde:

$CMP_k$ : quantidade de madeira em  $m^3$  a ser comprada para processo, no período  $k$ ;

$VMCP_k$ : volume máximo de madeira para processo em  $m^3$  o qual pode ser adquirido no período  $k$ ;

$PP$ : número máximo de períodos a serem considerados no planejamento.

A restrição ( 3 ) pode ser reescrita em ( 4 ) :

(4)  $CMP_k + FCMP_k = VMCP_k, \forall k = 1, \dots, PP$ , onde  $FCMP_k$  representa a folga de compra de madeira para processo, isto é, a diferença entre o máximo permitido de compra em  $m^3$  e o que realmente foi comprado.

### 3.1.2.3 Restrições de demandas

Foram considerados  $NE$  estratos no modelo, sendo que alguns deles são estratos com árvores podadas e outros com não-podadas.

Estes estratos fornecem produtos que, em função da origem da área ( podada  $p$ , não-podada  $sp$  ) e de sua bitola comercial, são definidos como:

- serraria ( S );
- laminado ( L );
- processo ( P );
- energia ( En ).

Na Tabela 01 estão representados os produtos que foram considerados no modelo, seu estrato de origem e a simbologia usada para representá-los.

Representando por  $l$  qualquer produto, o número máximo de produtos  $NP$  considerados no modelo foi de dez, então  $NP=10$ .

Para descrever as restrições de demanda é necessário considerar a demanda mínima exigida de cada produto, em cada período de planejamento. Portanto, ter-se-ão ao todo  $NP.PP$  restrições de demanda.

Uma dificuldade que aparece na modelagem é o fato que, apesar de cada produto ter sua bitola mínima definida, pode ocorrer que, na falta de um produto, outro de bitola superior pode substituir a demanda do primeiro. Outro cuidado que deve ser considerado na modelagem, é que deve-se impedir, através das equações de restrições das demandas, a sobreposição de uso de uma mesma quantidade de madeira, para dois ou mais produtos diferentes.

TABELA 01: DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS FLORESTAIS CONSIDERADOS NO MODELO, SUA ABREVIÇÃO E ESTRATO ORIGEM

PRODUTOS	<i>l</i>	Abreviação	Estrato podado	Estrato Não Podado
Serraria podada	1	<i>Sp</i>	x	
Laminado 1 podado	2	<i>L1p</i>	x	
Laminado 2 podado	3	<i>L2p</i>	x	
Laminado 3 podado	4	<i>L3p</i>	x	
Serraria sem poda	5	<i>Ssp</i>		x
Laminado 1 sem poda	6	<i>L1sp</i>		x
Laminado 2 sem poda	7	<i>L2sp</i>		x
Laminado 3 sem poda	8	<i>L3sp</i>		x
Processo	9	<i>P</i>	x	x
Energia	10	<i>En</i>	x	x

Na Figura 03 estão apresentadas as distribuições de utilização máximas por produto, em função do diâmetro mínimo.

Os valores 8, 18, 25, 35 e 45 cm representam o diâmetro na ponta fina com casca, da madeira usada para energia e processo, serraria, laminado 1, laminado 2 e laminado 3, respectivamente.

A madeira para ser usada no processo de fabricação de papel *P*, pode ser obtida até um diâmetro máximo de 45 cm ( $\phi \leq 45$  cm), devido à restrição de ordem técnica das máquinas do picador, na produção da massa de papel.

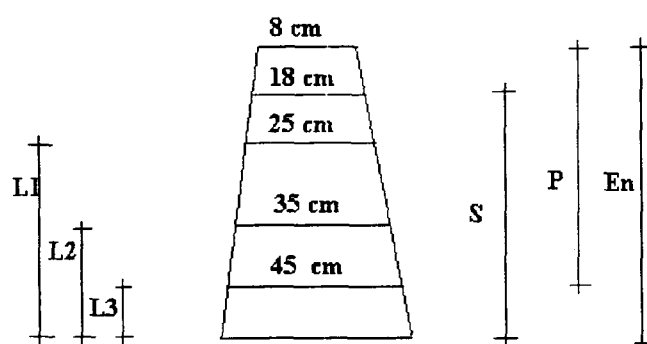
Observa-se que, tendo o comprimento mínimo exigido para o produto, qualquer bitola serve para energia, a madeira para laminado L3 pode ser usada para atender demandas do próprio L3, L2, L1, S ou En, e assim por diante. Isto significa que os níveis de produção específicos  $a_{ij}^{lk}$  em  $m^3 / ha$  do estrato *i*, manejado segundo o regime *j*, para o produto *l* no



período  $k$ , eventualmente podem ser utilizados para atender outro produto que lhe seja compatível.

Define-se nível de produção específica do produto  $l$ , como sendo a produção obtida através de um simulador de produções. O simulador retira primeiro a produção específica para o produto L3, depois para L2 e assim por diante, considerando a bitola mínima e comprimento exigidos.

FIGURA 03: UTILIZAÇÃO MÁXIMA DOS PRODUTOS FLORESTAIS POR BITOLA COMERCIAL



Tendo-se a produção específica  $a_{ij}^{lk}$  para cada produto  $l$ , a produção máxima para cada um dos produtos é obtida da forma:

- a produção máxima de serraria podada é obtida pela soma das produções específicas de qualquer laminado podado e da própria produção de serraria podada;
- a produção máxima de laminado L1 podado corresponde à produção de qualquer laminado podado;
- a produção máxima de laminado L2 podado corresponde à produção do laminado L2 e do laminado L3, podados;

- a produção máxima de laminado L3 podado só corresponde à produção do próprio laminado L3 podado;
- as produções máximas dos produtos não-podados,  $l=5, 6, 7$  e  $8$ , são obtidas de forma análoga;
- a produção máxima de processo é obtida pela soma das produções específicas da produção da serraria, laminados tipo L1 e L2, podados e não-podados e da produção específica de processo;
- a produção máxima de energia é a produção total, isto é, toda produção pode ser usada para energia e o coeficiente de produção máximo de energia é a soma de todos os coeficientes de produção específicos.

As restrições de demanda dos 10 produtos considerados, em todos os períodos de planejamento, foram desenvolvidas de forma a atender duas situações já discutidas:

1. Quando existe demanda de um produto menos nobre e sobra de um mais nobre, este pode ser utilizado para suprir a demanda devida;
2. Como existe interseção de utilização entre os produtos, é necessário evitar que um mesmo volume seja utilizado mais de uma vez.

Foram consideradas 10 restrições relativas a cada um dos 10 produtos, para cada período. Nas equações a seguir,  $a_{ij}^{lk}$  representa a produção específica em  $m^3 / ha$ , do produto  $l$ , no período  $k$ , quando o estrato  $i$  tiver sido manejado segundo o regime  $j$ .

**Equações de demandas para os produtos podados:**

Para o produto serraria com poda  $l=1$ , que tem sobreposição de uso com os produtos  $l=2, l=3$  e  $l=4$ :

$$(5) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{1k} + a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) x_{ij} \geq D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{4k} ; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

onde  $D_{lk}$  representa a demanda do produto  $l$ , no período  $k$ .

Esta restrição diz que tudo que é produzido e que pode ser utilizado para a serraria com poda, deve ser maior ou igual as demandas dos laminados e serraria, podados.

Será permitida a venda do produto  $l$  no período  $k$ . Chamando de  $V_{lk}$  o volume vendido em  $m^3$  do produto  $l$  no período  $k$ , a restrição (5) pode ser reescrita em :

$$(6) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{1k} + a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) \cdot x_{ij} - V_{1k} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} \geq D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{4k} ; \\ \forall k = 1, \dots, PP.$$

Substituindo a desigualdade (6) por uma igualdade, através de uma variável de excesso, aqui chamada de  $FCP_{lk}$ , a folga de capacidade produtiva do produto  $l$ , no período  $k$ , tem-se :

$$(7) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{1k} + a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) \cdot x_{ij} - V_{1k} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{lk} = \\ = D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{4k} ; \quad \forall k = 1, \dots, PP.$$

A variável  $FCP_{lk}$  representa a quantidade em  $m^3$ , que poderia ser utilizada para os produtos  $l$ 's considerados na restrição, no período  $k$ , mas que não foi utilizada, ou seja, é uma folga de uso. Esta folga, se positiva, pode ser usada para atender as demandas dos outros produtos que não estão contemplados na restrição e, se a folga for nula, significa que toda capacidade produtiva dos produtos  $l$ 's foi usada para os produtos que estão na restrição considerada.

A igualdade (7) ainda será alterada no modelo final, pois para resolvê-lo haverá necessidade de se ter uma base inicial. Considerando o método Big - M, conforme apresentado em MURTY (1985), uma nova variável,  $VA_{1k}$ , chamada artificial será acrescentada em cada restrição. Se o problema tiver solução esta variável é nula na solução ótima. Então:

$$(8) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{1k} + a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) \cdot x_{ij} - V_{1k} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{1k} + VA_{1k} = \\ = D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP.$$

As equações para os produtos podados restantes serão obtidas de forma análoga.

**Para o produto laminado L1 com poda,  $l=2$ , que tem sobreposição de uso com os produtos  $l=3$  e  $l=4$ :**

$$(9) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) \cdot x_{ij} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{2k} + VA_{2k} = D_{2k} + D_{3k} + D_{4k}; \\ \forall k = 1, \dots, PP.$$

**Para o produto laminado L2 com poda,  $l=3$ , que tem sobreposição de uso com o produto  $l=4$ :**

$$(10) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{4k}) \cdot x_{ij} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{3k} + VA_{3k} = D_{3k} + D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP.$$

**Para o produto laminado L3 com poda,  $l=4$ , que não tem sobreposição de uso com nenhum outro produto:**

$$(11) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{4k} x_{ij} - V_{4k} - FCP_{4k} + VA_{4k} = D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP.$$

As equações (8), (9), (10) e (11) impedem a sobreposição de uso de um produto para outro. Equação (8) diz que toda produção de todos laminados, mais a produção específica de serraria devem atender as demandas de serraria e dos próprios laminados. Depois da venda dos produtos, pode sobrar alguma produção que é dada por  $FCP_{1k}$ .

Equação (9) diz que toda produção de laminados devem atender as demandas de laminados, sua venda e ainda pode sobrar  $FCP_{2k}$ . A mesma interpretação vale para a equação (10). Equação (11) diz que só a produção específica do laminado L3 é que pode atender a demanda do laminado L3, além da venda  $V_{4k}$ . Pode sobrar alguma produção que é representada por  $FCP_{4k}$ .

Através da diferença dessas equações é que fica implícito o fato de que um determinado volume não pode ser utilizado mais de uma vez. Para esclarecer este fato, supõe-se que as variáveis artificiais são nulas; fazendo-se a diferença da equação (10) com (11), tem-se:

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{3k} x_{ij} - V_{3k} - FCP_{3k} + FCP_{4k} = D_{3k} \Rightarrow$$

$$(10') \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{3k} x_{ij} + FCP_{4k} = D_{3k} + V_{3k} + FCP_{3k}.$$

$FCP_{4k}$  representa a folga que existe na produção do laminado L3, a qual representa uma flexibilidade de volume que pode ser utilizado para laminado L2, se necessário. Como apenas a demanda  $D_{4k}$  é obrigatória, a venda  $V_{4k}$  pode ser reduzida quando houver necessidade de mais folga deste produto, para atender a demanda  $D_{3k}$  do outro produto laminado L2 (quando, por exemplo, a produção específica do laminado L2,  $a_{ij}^{3k}$ , não é suficiente para

atender a demanda  $D_{3k}$  e torna-se necessário avançar na produção do laminado L3, pois

sempre há uma sobra dada por  $\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{4k} x_{ij} - D_{4k} \geq 0$ , considerando-se o PL factível).

A restrição (11) evita que na restrição (10), parte da produção do laminado L2 seja usado para o laminado L3, o que não pode acontecer.

A equação (10') significa: toda produção específica de laminado L2, mais o que sobrou da produção do laminado L3,  $FCP_{4k}$ , deve ser igual a demanda do laminado L2,  $D_{3k}$ , sua venda  $V_{3k}$  e ainda pode sobrar alguma produção dada por  $FCP_{3k}$ .

Subtraindo-se a equação (10) da (9), tem-se:

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{2k} x_{ij} - V_{2k} - FCP_{2k} + FCP_{3k} = D_{2k} \Rightarrow$$

$$(9') \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{2k} x_{ij} + FCP_{3k} = D_{2k} + V_{2k} + FCP_{2k}.$$

Esta equação diz que, o que sobrou da produção do laminado L2,  $FCP_{3k}$ , pode ser usado junto com a produção específica da laminado L1,  $\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{2k} x_{ij}$ , para atender a demanda do laminado L1,  $D_{2k}$ , vender a quantidade  $V_{2k}$  deste produto e ainda pode haver sobra dada por  $FCP_{2k}$ .

Na equação (9'), como apenas a demanda  $D_{2k}$  é obrigatória e a produção específica

$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{2k} x_{ij}$  é fixa, as folgas  $FCP_{2k}$  e  $FCP_{3k}$  podem ser ajustadas para atender as demandas,

mesmo em detrimento da venda  $V_{2k}$ .

Subtraindo-se a equação (9) da (8), tem-se:

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{1k} x_{ij} - V_{1k} - FCP_{1k} + FCP_{2k} = D_{1k} \Rightarrow$$

$$(8') \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{1k} x_{ij} + FCP_{2k} = D_{1k} + V_{1k} + FCP_{1k}.$$

As interpretações quanto ao uso e folgas são análogas as feitas com as equações anteriores.

**Equações de demandas para os produtos não-podados:**

**Para o produto serraria sem poda,  $l=5$ , que tem sobreposição de uso com os produtos  $l=6$ ,  $l=7$  e  $l=8$ :**

$$(12) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{5k} + a_{ij}^{6k} + a_{ij}^{7k} + a_{ij}^{8k}) \cdot x_{ij} - V_{5k} - V_{6k} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{5k} + VA_{5k} = \\ = D_{5k} + D_{6k} + D_{7k} + D_{8k} ; \forall k = 1, \dots, PP.$$

**Para o produto laminado L1 sem poda,  $l=6$ , que tem sobreposição de uso com os produtos  $l=7$  e  $l=8$ :**

$$(13) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{6k} + a_{ij}^{7k} + a_{ij}^{8k}) \cdot x_{ij} - V_{6k} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{6k} + VA_{6k} = D_{6k} + D_{7k} + D_{8k} ; \\ \forall k = 1, \dots, PP.$$

**Para o produto laminado L2 sem poda,  $l=7$ , que tem sobreposição de uso com o produto  $l=8$ :**

$$(14) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{7k} + a_{ij}^{8k}) \cdot x_{ij} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{7k} + VA_{7k} = D_{7k} + D_{8k}; \forall k = 1, \dots, PP.$$

**Para o produto laminado L3 sem poda  $l=8$ , que não tem sobreposição de uso com os demais produtos :**

$$(15) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{8k} x_{ij} - V_{8k} - FCP_{8k} + VA_{8k} = D_{8k}, \forall k = 1, \dots, PP.$$

As considerações em relação a estas equações são análogas as feitas às equações de (8) até (11). A única diferença é que estes produtos são obtidos de estratos podados.

**Equação de demanda para o produto  $l=9$  que tem sobreposição de uso com os produtos  $l=1, 2, 3, 5, 6, 7$  e  $10$ :**

A equação relativa à demanda de madeira para processo, resulta do fato de que nem todos os produtos podem ser usados para suprir esta demanda, em caso de falta; o coeficiente de produção máximo não considera as produções do laminado L3, com e sem poda, conforme justificado na apresentação dos produtos. Outra consideração que se faz é que tanto os estratos podados e os não-podados podem contribuir para atender a demanda de madeira para processo.

Inicialmente, considera-se a equação da forma:

$$(16) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (a_{ij}^{1k} + a_{ij}^{2k} + a_{ij}^{3k} + a_{ij}^{5k} + a_{ij}^{6k} + a_{ij}^{7k} + a_{ij}^{9k}) \cdot x_{ij} - V_{1k} - V_{2k} - V_{3k} - V_{5k} - V_{6k} - V_{7k} - V_{9k} + CMP_k - FCP_{9k}' + VA_{9k} = D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{5k} + D_{6k} + D_{7k} + D_{9k},$$

$$\forall k = 1, \dots, PP.$$

Substituindo a equação (16) pela equação (16'), obtida pela combinação linear das equações (16), (8), (12), (11) e (15), da forma (16')=(16)-(8)-(12)+(11)+(15), tem-se:



$$(16') \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{9k} x_{ij} + CMP_k - V_{9k} - FCP_{9k} + VA_{9k} = D_{9k}, \forall k = 1, \dots, PP.$$

A folga neste caso é  $FCP_{9k} = FCP_{9k} - (FCP_{1k} - FCP_{4k}) - (FCP_{5k} - FCP_{8k})$  e poderia ser utilizada para qualquer outro produto, com exceção do laminado tipo L3. A folga  $FCP_{1k}$  representa o que sobrou dos podados após o cálculo da demanda da serraria. Desta folga foi retirado a parte  $FCP_{4k}$  que não pode ser usada para processo, sobrando  $(FCP_{1k} - FCP_{4k})$ . Da mesma forma, a quantidade  $(FCP_{5k} - FCP_{8k})$  é o que sobrou dos não-podados e que pode ser usado para o processo.

**Equação de demanda do produto  $l=10$  que tem sobreposição de uso com todos os outros produtos:**

A equação referente ao produto 10, madeira para energia, que pode ser obtida de qualquer estrato, representa a equação de balanço de produção, isto é, tudo o que é produzido, mais as compras, é igual as demandas totais, vendas e folgas, se houverem. Neste caso, como se está maximizando a receita, a folga de capacidade produtiva relativa ao produto  $l=10$  deve ser nula ( $FCP_{10k} = 0$ ). A equação final desta demanda fica:

$$(17) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} \sum_{l=1}^{NP} a_{ij}^{lk} x_{ij} + CMP_k - \sum_{l=1}^{NP} V_{lk} - FCP_{10k} + VA_{10k} = \sum_{l=1}^{NP} D_{lk}, \forall k = 1, \dots, PP.$$

#### 3.1.2.4 Restrições de controle de corte de volume global

Em geral são necessárias restrições que evitem que haja um volume de corte muito acentuado nos primeiros anos de planejamento, já que o Valor Líquido Presente Geral usado na Função Objetivo, prioriza as receitas obtidas nos primeiros anos de planejamento. Para

evitar isto, limita-se a produção global nos  $P$  primeiros períodos de planejamento através das restrições :

$$(18) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} \alpha_{ij}^{10k} x_{ij} \leq VMAX_k, \quad \forall k = 1, \dots, P.$$

onde  $VMAX_k$  representa o volume máximo em  $m^3$  permitido para corte no período  $k$  e  $\alpha_{ij}^{10k}$  a produção máxima de madeira para energia no período  $k$ .

Caso haja folga neste máximo permitido, esta folga pode ser medida pela variável  $FVMAX_k$  em  $m^3$ . Daí ( 18 ) transforma-se em :

$$(19) \quad \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} \alpha_{ij}^{10k} x_{ij} + FVMAX_k = VMAX_k, \quad \forall k = 1, \dots, P.$$

### 3.1.3 Função Objetivo

A função objetivo considerada no problema foi maximizar o Valor Líquido Presente ( $VLP$ ) da renda total ao longo de todo período de planejamento, acrescentado de um valor terminal  $VT$  associado a cada estrato  $i$  e regime de manejo  $j$ , trazido para o valor presente, supondo que após o período de planejamento cada estrato será manejado segundo seu regime economicamente ótimo (REO), em perpetuidade. O valor terminal considera a possibilidade futura do uso da madeira e o  $VLP$  calculado desta forma é chamado de Valor Presente Líquido Geral.

A receita líquida total depende da receita devida aos contratos já efetuados, que são as demandas obrigatórias ( $RDO$ ), das vendas dos produtos a terceiros ( $R_V$ ), dos custos de manejo ( $C_M$ ) e valores terminais ( $VT_M$ ), como também da compra de madeira para processo ( $C_{CMP}$ ), permitida em caso de necessidade.

As demandas obrigatórias contribuem com uma receita presente calculada por

$$(20) \quad RDO = \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} D_{lk} \frac{PV_{lk}}{(1 + juro)^k} \quad \text{onde:}$$

$juro$ : taxa de juro anual, suposta constante ao longo do período de planeamento;

$D_{lk}$ : demanda obrigatória do produto  $l$ , no período  $k$ , em  $m^3$ ;

$PV_{lk}$ : preço de venda do produto  $l$ , no período  $k$  em  $US\$/m^3$ .

Os valores presentes dos custos de manejo são calculados pela fórmula

$$(21) \quad C_M = \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} c_{ij} x_{ij} \quad \text{onde:}$$

$c_{ij}$ : custo presente para manejar o lote  $i$  segundo o regime  $j$  em  $US\$/ha$ .

O custo  $c_{ij}$  é por sua vez calculado por  $c_{ij} = \sum_{k=1}^{PP} \frac{c_{ij}^k}{(1 + juro)^k}$  e  $c_{ij}^k = \sum_{s=1}^{NA_k} c_{ij}^{ks}$ , sendo:

$NA_k$ : o número de atividades envolvidas no manejo  $j$  do estrato  $i$ , durante o período  $k$ ;

$c_{ij}^{ks}$ : o custo da atividade  $s$ , no período  $k$ , do estrato  $i$ , manejado segundo o regime  $j$ .

Os valores terminais presentes associados a cada estrato e regime são calculados por :

$$(22) \quad VT_M = \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} \frac{VT_{ij}}{(1 + juro)^{PP}} x_{ij} \quad \text{onde:}$$

$VT_{ij}$ : o valor terminal associado ao regime  $i$  e manejo  $j$ , em  $US\$/ha$ , em  $PP$ .

Os custos presentes devido à compra de madeira para processo são obtidos por

$$(23) \quad C_{CMP} = \sum_{k=1}^{PP} \frac{PC_k}{(1 + juro)^k} \cdot CMP_k \quad \text{onde:}$$

$PC_k$ : preço de compra de madeira para processo, no período  $k$ , em  $US\$/m^3$ ;

$CMP_k$ : quantidade adquirida de madeira para processo no período  $k$ , em  $m^3$ .

Os custos relativos às variáveis artificiais são calculados pela somatória abaixo:

$$(24) \quad C_{VA} = \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} M.VA_{lk}, \text{ onde:}$$

$M$  : representa um custo muito alto, significando uma penalidade, de forma que qualquer variável  $VA_{lk}$  não deva estar na solução ótima a menos que o problema seja impossível. O valor de  $M$  pode variar dependendo do produto  $l$  e do período  $k$ . Por exemplo, se o planejador quiser que o produto madeira para processo seja o último a deixar de ser atendido, o valor de  $M_{9k}$  associado ao produto  $l=9$ , deve ser bem maior que os demais.

$VA_{lk}$  : variável artificial associada à restrição de demanda do produto  $l$ , no período  $k$ .

Este custo deve ser nulo na solução ótima, se o PL é factível, pois  $VA_{lk}=0$  no ótimo.

A receita presente devida à venda de qualquer produto a terceiros, em todos os períodos de planejamento, após as demandas obrigatórias serem atendidas é obtida por:

$$(25) \quad R_V = \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} \frac{PV_{lk}}{(1 + juro)^k} \cdot V_{lk} \text{ onde:}$$

$V_{lk}$ : quantidade vendida em  $m^3$ , do produto  $l$ , no período  $k$ .

Portanto, a Receita Presente Líquida Total do investimento é obtida por:

$$(26) \quad z = FO = RDO + R_V - C_M + VT_M - C_{CMP} - C_{VA} \Rightarrow$$

$$(27) \quad z = RDO + \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} \frac{PV_{lk}}{(1 + juro)^k} \cdot V_{lk} - \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (c_{ij} - VT_{ij})x_{ij} - \sum_{k=1}^{PP} \frac{PC_k}{(1 + juro)^k} \cdot CMP_k -$$

$$\sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} M.VA_{lk} .$$

### 3.1.4 O modelo florestal

De acordo com os itens explanados anteriormente, o modelo a trabalhar é o seguinte:

$$\max z = RDO + \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} \frac{PV_{lk}}{(1 + juro)^k} \cdot V_{lk} - \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} (c_{ij} - VT_{ij}) x_{ij} - \sum_{k=1}^{PP} \frac{PC_k}{(1 + juro)^k} \cdot CMP_k -$$

$$\sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} M \cdot VA_{lk}$$

sujeito as seguintes restrições:

$$x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iNR} + FA_i = AREA_i, \quad \forall i = 1, \dots, NE$$

$$CMP_k + FCMP_k = VMCP_k, \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{1k} x_{ij} - V_{1k} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{1k} + VA_{1k} = D_{1k} + D_{2k} + D_{3k} + D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{2k} x_{ij} - V_{2k} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{2k} + VA_{2k} = D_{2k} + D_{3k} + D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{3k} x_{ij} - V_{3k} - V_{4k} - FCP_{3k} + VA_{3k} = D_{3k} + D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{4k} x_{ij} - V_{4k} - FCP_{4k} + VA_{4k} = D_{4k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{5k} x_{ij} - V_{5k} - V_{6k} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{5k} + VA_{5k} = D_{5k} + D_{6k} + D_{7k} + D_{8k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{6k} x_{ij} - V_{6k} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{6k} + VA_{6k} = D_{6k} + D_{7k} + D_{8k}; \quad \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{7k} x_{ij} - V_{7k} - V_{8k} - FCP_{7k} + VA_{7k} = D_{7k} + D_{8k}; \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{8k} x_{ij} - V_{8k} - FCP_{8k} + VA_{8k} = D_{8k}; \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{9k} x_{ij} + CMP_k - V_{9k} - FCP_{9k} + VA_{9k} = D_{9k}; \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{10k} x_{ij} + CMP_k - \sum_{l=1}^{NP} V_{lk} - FCP_{10k} + VA_{10k} = \sum_{l=1}^{NP} D_{lk}; \forall k = 1, \dots, PP$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{NR} a_{ij}^{10k} x_{ij} + FVMAX_k = VMAX_k; \forall k = 1, \dots, P.$$

sendo que todas as variáveis envolvidas são maiores ou iguais a zero.

Os coeficientes de produção  $a_{ij}^{lk}$  representados neste modelo são os coeficientes de produção máximos para as restrições relativas aos produtos  $l=1, \dots, 8$  e  $l=10$  e de produção específico para  $l=9$ .

A matriz tecnológica  $A$  do modelo está representada na Figura 04.

FIGURA 04: MATRIZ TECNOLÓGICA A DO MODELO FLORESTAL

VARIÁVEIS	Variáveis de Manejo						Folga de área	Compra Madeira P	Folga de Compra	
	$x_{1,1}$	.....	$x_{1,NR}$	.....	$x_{NE,1}$	.....	$x_{NE,NR}$	$FA_1$ ..... $FA_{NE}$	CMP(1,PP)	FCMP(1,PP)
RESTRIÇÕES	1	.....	1	.....						
restrições de área				1.....1			1			
restrições de compra de madeira para processo								1.....1		1.....1
restrições de demanda	$a_{1,1,1}$	.....	$a_{1,NR,1,1}$	.....	$a_{NE,1,1,1}$	.....	$a_{NE,NR,1,1}$			
	$a_{1,1,2}$	.....	$a_{1,NR,2,1}$	.....	$a_{NE,1,2,1}$	.....	$a_{NE,NR,2,1}$			
	$a_{1,1,9}$	.....	$a_{1,NR,9,1}$	.....	$a_{NE,1,9,1}$	.....	$a_{NE,NR,9,1}$	1		
	$a_{1,1,10,1}$	.....	$a_{1,NR,10,1}$	.....	$a_{NE,1,10,1}$	.....	$a_{NE,NR,10,1}$	1		
	$a_{1,1,1,PP}$	.....	$a_{1,NR,1,PP}$	.....	$a_{NE,1,1,PP}$	.....	$a_{NE,NR,1,PP}$			
	$a_{1,1,2,PP}$	.....	$a_{1,NR,2,PP}$	.....	$a_{NE,1,2,PP}$	.....	$a_{NE,NR,2,PP}$			
	$a_{1,1,9,PP}$	.....	$a_{1,NR,9,PP}$	.....	$a_{NE,1,9,PP}$	.....	$a_{NE,NR,9,PP}$		1	
	$a_{1,1,10,PP}$	.....	$a_{1,NR,10,PP}$	.....	$a_{NE,1,10,PP}$	.....	$a_{NE,NR,10,PP}$		1	
restrições de volume global	$a_{1,1,10,1}$	.....	$a_{1,NR,10,1}$	.....	$a_{NE,1,10,1}$	.....	$a_{NE,NR,10,1}$			
	$a_{1,1,10,P}$	.....	$a_{1,NR,10,P}$	.....	$a_{NE,1,10,P}$	.....	$a_{NE,NR,10,P}$			

continua...

FIGURA 04: MATRIZ TECNOLÓGICA A DO MODELO FLORESTAL

Vendas V										Folga Capac. Produtiva	Variável Artificial	Folga de Vol. Max.	RHS	
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>9</sub>	V <sub>10</sub>	V(NP.PP)	FCP(1,NP.PP)	VA(1,NP.PP)	FVMAX(1,P)	b
														AREA <sub>1</sub>
														AREA <sub>2</sub>
														.....
														.....
														.....
														AREA <sub>NE</sub>
														VCMP <sub>1</sub>
														.....
														VCMP <sub>PP</sub>
														D <sub>1,1</sub> +D <sub>2,1</sub> +D <sub>3,1</sub> +D <sub>4,1</sub>
														D <sub>2,1</sub> +D <sub>3,1</sub> +D <sub>4,1</sub>
														.....
														D <sub>9,1</sub>
														D <sub>total1</sub>
														.....
														D <sub>1,PP</sub> +D <sub>2,PP</sub> +D <sub>3,PP</sub> +D <sub>4,PP</sub>
														D <sub>2,PP</sub> +D <sub>3,PP</sub> +D <sub>4,PP</sub>
														.....
														D <sub>9,PP</sub>
														D <sub>totalPP</sub>
														.....
														VMAX <sub>1</sub>
														.....
														VMAX <sub>P</sub>



### 3.2 ALGORITMOS USADOS

O modelo apresentado na seção 3.1.4 requer algoritmos da Programação Linear para ser resolvido. Dois algoritmos serão utilizados : o Simplex Revisado e a técnica do GUB - Generalized Upper Boundings.

O método Simplex Revisado deriva do Método Simplex, sendo seu uso mais conveniente para o modelo em questão, pois não exige que todas as colunas da matriz tecnológica  $A$  sejam atualizadas em cada iteração, só quando forem necessárias. O método GUB pode ser usado em modelos cujas restrições têm uma forma particularizada, em blocos de variáveis, já foi utilizado por CARNIERI (1989), com sucesso. Este método será particularizado para o modelo florestal desenvolvido na seção 3.1 .

#### 3.2.1 Método Simplex

O modelo florestal desenvolvido na seção 3.1 é um modelo de Programação Linear, podendo ser escrito da forma:

$$\begin{array}{ll} \max & z = c^T \cdot x \\ \text{sujeito a} & A \cdot x = b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

onde  $c(n \times 1)$ ,  $b(m \times 1)$ ,  $A(m \times n)$  e  $x(n \times 1)$ , sendo  $m$  o número de restrições e  $n$  o número de variáveis. Este modelo será chamado de PL1.

Se  $m < n$ , então o sistema  $A \cdot x = b$  tem infinitas soluções, em geral.

O método Simplex procura a melhor entre essas infinitas soluções, cujo procedimento depende de alguns fatos que serão discutidos a seguir.

Particionando a matriz  $A$  da forma  $A = (B, N)$  e correspondentemente o vetor das variáveis de decisão  $x^T = (x_B, x_N)$ , o sistema de equações  $A \cdot x = b$  pode ser reescrito da forma:

$$(28) \quad B \cdot x_B + N \cdot x_N = b$$

onde  $B(m \times m)$ ,  $N(m \times (n-m))$ ,  $x_B(m \times 1)$ ,  $x_N((n-m) \times 1)$ .

Fazendo  $x_N = 0$  em (28), então  $x_B = B^{-1} \cdot b$  representa uma das infinitas soluções do sistema  $A \cdot x = b$ .

Uma solução do tipo  $x^T = (x_B, 0)$  é chamada de solução básica do sistema, sendo que  $x_B$  é formado pelas variáveis chamadas básicas e  $x_N$  pelas variáveis não - básicas.

Usando esta nova notação, o PL1 pode ser reescrito da forma:

$$(29) \quad \max z = c_B \cdot x_B + c_N \cdot x_N$$

$$(30) \quad \text{sujeito a } B \cdot x_B + N \cdot x_N = b, \quad b \geq 0, \quad x_B, x_N \geq 0.$$

De (30):

$$(31) \quad x_B = B^{-1} \cdot b - B^{-1} \cdot N \cdot x_N.$$

Substituindo (31) em (29) tem-se:

$$z = c_B \cdot B^{-1} \cdot b - c_B \cdot B^{-1} \cdot N \cdot x_N + c_N \cdot x_N \Rightarrow$$

$$(32) \quad z = c_B \cdot B^{-1} \cdot b + (c_N - c_B \cdot B^{-1} \cdot N) \cdot x_N.$$

O método Simplex baseia-se nos seguintes argumentos:

- A solução ótima se encontra entre as soluções básicas do sistema.
- Seja uma solução corrente básica do sistema  $A \cdot x = b$ ; como  $x_N = 0$ , de (31) e (32) tem-se que  $x_B = B^{-1} \cdot b$  e  $z = c_B \cdot B^{-1} \cdot b$ .

- A partir de uma solução corrente básica, o método procura outra solução também básica de  $A \cdot x = b$ , de tal forma que  $z$  assuma um valor maior ou igual ao atual.
- Com o intuito de aumentar o valor da função objetivo, faz-se uma troca entre uma variável básica por uma não - básica. Observando a expressão (32), para que  $z$  aumente tem que se ter  $(c_N - c_B \cdot B^{-1} \cdot N) > 0$  para alguma variável não - básica. Se for escolhido uma variável não - básica  $x_j$  tal que  $((c_N)_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot N_j) > 0$  seja o maior possível, então  $z$  aumenta. Se  $((c_N)_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot N_j) \leq 0, \forall j$  não - básico, então já se está no ótimo, pois  $z$  não tem mais como aumentar.
- Tendo escolhido alguma variável não - básica para entrar na base, decide-se através de um bloqueio, que evita que outras variáveis fiquem negativas, qual variável básica vai sair da base  $B$ . A base  $B$  é formada pelas colunas da matriz tecnológica, associadas às variáveis básicas. Colocam-se as variáveis básicas em função das não - básicas, isto é,  $x_B = B^{-1} \cdot b - B^{-1} \cdot N \cdot x_N$ . Observa-se que, quando algum  $(x_N)_j$  sai do nível zero e aumenta, algum  $(x_B)_r$  diminui. A primeira variável básica que atinge o nível zero é retirada da base, já que a restrição  $x \geq 0$  tem que ser verificada sempre.
- Expressa-se o problema em função da nova base  $B$  e volta-se a procura de uma melhor solução, se for o caso.

Para dar início ao processo é necessário que uma solução inicial seja conhecida. Quando isto não acontece, pode-se utilizar variáveis artificiais com custo bastante alto, para inicializar o algoritmo, de modo que na solução final ótima estas variáveis não estejam na base (se o PL1 tiver solução). Este método é chamado de Big - M. Com o acréscimo das variáveis artificiais, o PL1 toma a forma do modelo que será identificado por PL2:

$$\begin{aligned} \max z &= c^T \cdot x - M \cdot x_a \\ A \cdot x + I \cdot x_a &= b, \quad b \geq 0 \\ x &\geq 0, \quad x_a \geq 0 \end{aligned}$$

Se  $x_a = 0$  na solução ótima do PL2, então PL1 e PL2 são equivalentes.

Outro ponto que tem que ser analisado é sobre a decisão de como será escolhido a variável  $x_j$  que vai entrar na base  $B$ . Já foi citado o critério de escolher a variável não - básica com o maior valor do custo reduzido, isto é, maior  $(c_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_j)$ . Podem-se usar outros critérios, tal como o 'Partial Pricing'. Este critério faz a escolha da variável a entrar na base sobre um bloco de variáveis em cada iteração e não sobre a totalidade das variáveis não - básicas. Verifica-se que, computacionalmente existe vantagem sobre a escolha global, principalmente quando o número de variáveis é grande, tal como apresentado por CARNIERI (1989), em sua tese de doutorado.

### 3.2.2 Método Simplex Revisado

O modelo da seção 3.1 pode ter um número muito grande de variáveis, caso o número de estratos, regimes e períodos de planejamento sejam grandes.

O método Simplex supõe que todas as informações relativas a cada variável, através do vetor de custos e das colunas da matriz tecnológica, sejam explicitadas, o que acarretaria em uso de grande espaço computacional de trabalho.

Modificações podem ser feitas neste método para simplificar os cálculos e reduzir os problemas de memória computacional na execução do algoritmo. Só isto já justificaria o uso do Simplex Revisado.

Pode-se resumir o método Simplex Revisado em três passos:

1. Escolher uma variável não - básica para entrar na base através de algum critério (ou maior  $(c_N - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_N)$  ou 'Partial-Pricing'). Se  $(c_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_j) \leq 0, \forall j$  não - básico, a atual solução básica é ótima. De outra forma, seja  $x_k$  a variável escolhida e  $A_k$  a coluna original correspondente em  $N$ .
2. Escolher a variável a deixar a base. Atualiza-se a coluna  $A_k$  através do produto  $B^{-1} \cdot A_k$  .  
 Calcula-se  $\min_j \left\{ \frac{(B^{-1} \cdot b)_j}{(B^{-1} \cdot A_k)_j}, (B^{-1} \cdot A_k)_j > 0 \right\}$ ; supondo que o mínimo ocorra em  $\left\{ \frac{(B^{-1} \cdot b)_r}{(B^{-1} \cdot A_k)_r} \right\}$ , então  $x_r$  é a variável a deixar a base. Se  $(B^{-1} \cdot A_k)_j \leq 0, \forall j$ , então a solução é ilimitada.
3. Tendo determinado qual variável vai sair da base, coloca-se o sistema em função da nova base, isto é,  $x_B = B^{-1} \cdot b$  com  $B$  contendo a nova coluna  $A_k$  que entrou.

O método Simplex atualiza todas as colunas de  $A$  em todas as iterações, mesmo sem utilizá-las, porque apenas uma coluna é escolhida em cada iteração.

Para evitar trabalho desnecessário em cada iteração, o método Simplex Revisado só atualiza a coluna que vai entrar na base, antes de se fazerem os cálculos para ver qual variável vai sair da base.

A matriz  $B^{-1}$  é atualizada em cada iteração e carrega todas as informações necessárias para todas as atualizações. Portanto, para atualizar qualquer coluna da matriz inicial  $A$  até a iteração corrente, basta multiplicar a coluna por  $B^{-1}$ , isto é,  $A_{i,atualizada} = B^{-1} \cdot A_i$  . Da mesma forma deve-se proceder para o vetor  $b$ .

A grande vantagem do Simplex Revisado é que se pode trabalhar com um grande número de variáveis, sem necessariamente explicitar as colunas correspondentes da matriz tecnológica.

### 3.2.3 Método Generalized Upper Boundings - GUB

Suponha-se que o PL1 possa assumir a forma abaixo, denominada de PL3:

$$\begin{aligned}
 \max \quad z &= c_1^T \cdot x_1 + \dots + c_L^T \cdot x_L + c_0^T \cdot x_0 \\
 \text{s.a.} \quad &1^T \cdot x_1 = 1 \\
 &1^T \cdot x_2 = 1 \\
 &\dots \\
 &1^T \cdot x_L = 1 \\
 &M_1 \cdot x_1 + \dots + M_L \cdot x_L + M_0 \cdot x_0 = b \\
 &x_0, x_1, \dots, x_L \geq 0
 \end{aligned}$$

onde  $1^T = (1, 1, \dots, 1)$ ,  $1(n_j \times 1)$ ,  $c_j(n_j \times 1)$ ,  $M_j(m \times n_j)$ ,  $x_j(n_j \times 1)$ ,  $b(m \times 1)$ ,  $j = 0, \dots, L$ .

Supõe-se que o conjunto das variáveis possam ser particionadas em  $L+1$  conjuntos  $S_1, \dots, S_L, S_0$ , que as variáveis que estão no conjunto  $S_0$  participam apenas das  $m$  últimas restrições, e que as variáveis nos conjuntos  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$  têm soma igual a 1 ou um outro valor qualquer.

DANTZIG e VAN SLYKE (1967), propuseram um método que permite resolver o PL3 usando apenas a inversa de uma matriz, chamada de matriz de trabalho, de ordem  $(m \times m)$  e não  $(L+m) \times (L+m)$  como seria o usual. Quando  $m$  é bem menor que  $L$ , o método é vantajoso computacionalmente.

Dantzig e Van Slyke mostram que pelo menos uma variável de cada conjunto  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$  precisa ser básica, devido às restrições do tipo  $1^T \cdot x_i = 1$ .

Os conjuntos  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , que contêm mais de uma variável básica numa determinada iteração são ditos essenciais.

Os conjuntos  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , que contêm apenas uma variável na base numa determinada iteração são ditos não - essenciais.

Se  $B$  representa a base em uma dada iteração do método Simplex, ela pode ser representada da forma seguinte:

$$B = \begin{pmatrix} \text{colunas} & \cdot & \text{colunas} \\ \text{chaves} & \cdot & \text{não} \\ & \cdot & \text{chaves} \end{pmatrix}$$

Qualquer variável básica dos conjuntos  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , representada em qualquer uma das primeiras  $L$  colunas, é dita variável chave e a coluna associada a ela, a coluna chave. As outras variáveis básicas e colunas respectivas são ditas não - chaves.

O método GUB baseia-se nos argumentos apresentados a seguir, conforme discutidos em GASS (1975):

1. Seja  $B$  uma base, onde estejam representadas primeiro as colunas chaves da forma

$$B = \begin{pmatrix} I & G \\ Q & F \end{pmatrix}, \text{ onde } Q(m \times L), F(m \times m), I(L \times L) \text{ e } G(L \times m). I \text{ é a matriz identidade e}$$

$G$  ou tem colunas nulas ou colunas com apenas 1 na linha  $i$  correspondente à variável não - chave do conjunto  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ .

2. Uma solução básica é obtida por  $B \cdot x_B = b$ . ( 33 )

3. Vai-se aplicar uma transformação  $T$  em  $B$ , de tal forma que  $G$  se transforme na matriz nula.

$$\text{De (33): } B \cdot I \cdot x_B = (B \cdot T) \cdot (T^{-1} \cdot x_B) = b, \text{ escolhe-se } T \text{ tal que } BT = \begin{pmatrix} I & 0 \\ Q & H \end{pmatrix}.$$

4. Mostra-se que  $T = \begin{pmatrix} I & -G \\ 0 & I \end{pmatrix}$ ,  $H = -QG + F$  e que  $T^{-1} = \begin{pmatrix} I & G \\ 0 & I \end{pmatrix}$ . (34)

5.  $H$  é chamada matriz de trabalho, sendo que todos os passos do Simplex que utilizam da  $B^{-1}$  vão utilizar apenas  $H^{-1}$ , reduzindo então a dimensão da matriz a ser trabalhada.

6. A inversa de  $B$  pode ser determinada por

$$B^{-1} = (BTT^{-1})^{-1} = T(BT)^{-1} = T \cdot \begin{pmatrix} I & 0 \\ -H^{-1}Q & H^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I + GH^{-1}Q & -GH^{-1} \\ -H^{-1}Q & H^{-1} \end{pmatrix}$$

Portanto  $B^{-1} = f(H^{-1}, G, Q)$ .

7. Na atualização de qualquer coluna  $A_i$  da matriz tecnológica  $A$ , seja ela da forma  $\begin{pmatrix} e_i \\ \alpha \end{pmatrix}$  ou

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \alpha \end{pmatrix}, \text{ o cálculo é feito por } A_{i,atualizada} = B^{-1} \cdot A_i. \quad (35)$$

Para a 1ª situação tem-se:  $A_{i,atualizada} = B^{-1} \cdot A_i = B^{-1} \cdot \begin{pmatrix} e_i \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i - G(H^{-1}\alpha - H^{-1}q_i) \\ H^{-1}\alpha - H^{-1}q_i \end{pmatrix}$

onde  $e_i^T = (0, \dots, 1, \dots, 0)$ , com 1 na posição  $i$ ,  $e_i$  ( $L \times 1$ ),  $q_i$  coluna  $i$  de  $Q$  e  $\alpha$  os elementos da coluna  $A_i$  relativos às restrições, exceto de área. Então, para atualizar uma coluna qualquer da matriz tecnológica, precisa-se apenas de uma inversa, a de  $H$  que tem menor dimensão que  $B$ .

8. Na atualização do RHS, sendo  $RHS = \begin{pmatrix} 1 \\ b \end{pmatrix}$  então  $B^{-1} \cdot RHS = \begin{pmatrix} 1 - GH^{-1}(b - Q \cdot 1) \\ H^{-1}(b - Q \cdot 1) \end{pmatrix}$ .

9. Os multiplicadores  $\pi = c_B B^{-1}$ , necessários no cálculo para escolher qual variável vai entrar na base através do valor de  $(c_N - c_B \cdot B^{-1} \cdot N)$ , ficam também em função da inversa de  $H$ .

Seja  $\pi = c_B B^{-1} = (MI, PI)$ , onde  $MI$  são multiplicadores que se referem à parte chave e  $PI$  à



parte não-chave da base. Separando da mesma forma o vetor custo da base, tem-se

$c_B = (c_{Bchave}, c_{Bnchave}) = (c_{Bc}, c_{Bn})$ . Então:

$$(MI, PI) = (c_{Bc}, c_{Bn}) \cdot \begin{pmatrix} I + GH^{-1}Q & -GH^{-1} \\ -H^{-1}Q & H^{-1} \end{pmatrix}. \text{ Daí os multiplicadores ficam da forma:}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow PI &= (c_{Bn} - c_{Bc} \cdot G)H^{-1} \\ \Rightarrow MI &= c_{Bc} - (c_{Bn} - c_{Bc} \cdot G)H^{-1}Q = c_{Bc} - PI \cdot Q \end{aligned} \quad (36)$$

10. A atualização dos custos reduzidos  $c_i$  é feito por  $c_i - c_B B^{-1} A_i =$

$$= c_i - (MI, PI) \cdot \begin{pmatrix} e_i \\ \alpha_i \end{pmatrix} = c_i - (MI_i + PI \cdot \alpha_i), \text{ onde } e_i \text{ se refere ao estrato } i, A_i \text{ a coluna}$$

associada a este estrato na matriz  $A$ . Se a coluna não se refere a um estrato, então  $e_i = 0$ .

Portanto as atualizações de  $B$ , de qualquer coluna de  $A$ , de  $b$  e de  $(MI, PI)$ , só utilizam a inversa da matriz de trabalho  $H^{-1}$ . Com o cálculo dos custos reduzidos, determina-se qual variável vai entrar na base e daí qual vai sair. Dependendo da posição da variável que vai sair, ser chave ou não, podem ocorrer 3 situações que implicam em alterações da matriz inversa de trabalho. Seja uma iteração qualquer do GUB. Pode ocorrer que:

- A variável que vai sair não é chave;
- A variável que vai sair é chave e pertence a um conjunto essencial;
- A variável que vai sair é chave e pertence a um conjunto não - essencial.

Na primeira situação, a iteração é do tipo padrão do Simplex Revisado. Como  $B$  é do forma  $B = \begin{pmatrix} I & G \\ Q & F \end{pmatrix}$ , neste caso  $Q$  não muda. Como  $BT = \begin{pmatrix} I & 0 \\ Q & H \end{pmatrix}$  e

$$(BT)^{-1} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ -H^{-1}Q & H^{-1} \end{pmatrix} \text{ então só } H^{-1} \text{ precisa ser atualizada até a próxima iteração. Na}$$

segunda situação, a variável que vai sair é chave e pertence a  $S_i$  essencial. Nesta iteração faz-

se chave outra variável de  $S_i$  através de uma troca de colunas e daí tem-se uma situação análoga à primeira. Neste caso  $H$  muda e pode ser obtida por  $R.H^{-1} = H_{nova}^{-1}$ , onde  $R$  é uma matriz que representa a troca de colunas.  $Q$  também tem que ser alterado, pela troca de colunas das variáveis chaves. Na terceira situação a variável que está saindo é chave em  $S_i$  não - essencial. Neste caso  $H$  não altera, mas  $Q$  sim; a variável que está entrando pertence ao mesmo conjunto  $S_i$  não - essencial onde está a variável que está saindo. Portanto, apenas  $MI_i = c_{Bc_i} - PI.Q_i$  e  $B^{-1}.b$  precisam ser recalculados.

### 3.2.4 GUB aplicado ao modelo florestal

A utilização do método GUB ao modelo exposto na seção 3.1.4, é vantajosa já que as restrições de área são em geral em grande número, quando se está trabalhando com bastante estratos. Mais ainda, a matriz de trabalho independe do número de estratos.

Seja o modelo florestal da seção 3.1.4, que será chamado de PL4. Este modelo tem a forma do PL3 da seção 3.2.3 . Usando-se a mesma notação, tem-se:

$$S_0 = \left\{ CMP_1, \dots, CMP_{PP}, FCMP_1, \dots, FCMP_{PP}, V_1, \dots, V_{PP.NP}, FCP_1, \dots, FCP_{PP.NP}, VA_1, \dots, \dots, VA_{PP.NP}, FVMAX_1, \dots, FVMAX_P \right\}$$

$$S_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1NR}, FA_1\}$$

...

$$S_{NE} = \{x_{NE1}, x_{NE2}, \dots, x_{NE,NR}, FA_{NE}\}$$

$$x_0^T = (CMP, FCMP, V, FCP, VA, FVMAX)$$

$$x_1^T = (x_1, FA_1)$$

...

$$x_{NE}^T = (x_{NE}, FA_{NE})$$

$$c_0 = (-PC, 0, PV, 0, -M, 0)$$

$$c_1 = (c_1, c_{FA_1})$$

...

$$c_{NE} = (c_{NE}, c_{FA_{NE}})$$

Então o PL4 pode ser representado da forma:

$$\begin{aligned}
 \max \quad z &= RDO + c_1 \cdot x_1 + \dots + c_{NE} \cdot x_{NE} - PC \cdot CMP + PV \cdot V - M \cdot VA \\
 \text{sujeito a} \quad & 1 \cdot x_1 && & & & & = \text{ÁREA}_1 \\
 & \dots && && && \\
 & & & & & & 1 \cdot x_{NE} & = \text{ÁREA}_{NE} \\
 & M_1 \cdot x_1 + \dots + M_{NE} \cdot x_{NE} + & M_0 \cdot x_0 & & & & & = b
 \end{aligned}$$

onde  $b = (VMCP, \sum_{parcial} D, D, \sum D, VMAX)^T$ .

As matrizes  $M_0, M_i$  têm a forma das matrizes apresentadas nas Figuras 05 e 06, respectivamente.

FIGURA 05: REPRESENTAÇÃO DE PARTE DA MATRIZ TECNOLÓGICA - Matriz  $M_0$

CMP	FCMP	VENDAS V	FCP	VA	FVMAX
1.....	1.....				
.....	.....				
.....1	.....1				
		-1 -1 -1 -1	-1.....	1.....	
		-1 -1 -1			
		.....			
1.....		-1			
1.....		-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	.....-1	.....1	
.....					
.....					
					1.....
					.....
					.....1

FIGURA 06: REPRESENTAÇÃO DE PARTE DA MATRIZ TECNOLÓGICA - Matriz  $M_i$ 

$$M_i = \begin{pmatrix} 0 \dots & \dots & \dots & \dots 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots 0 & 0 \\ 0 \dots & \dots & \dots & \dots 0 & 0 \\ a_{i,1}^{1,1} & a_{i,2}^{1,1} & \dots & a_{i,NR}^{1,1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1}^{9,1} & a_{i,2}^{9,1} & \dots & a_{i,NR}^{9,1} & 0 \\ a_{i,1}^{10,1} & a_{i,2}^{10,1} & \dots & a_{i,NR}^{10,1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1}^{1,PP} & a_{i,2}^{1,PP} & \dots & a_{i,NR}^{1,PP} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1}^{9,PP} & a_{i,2}^{9,PP} & \dots & a_{i,NR}^{9,PP} & 0 \\ a_{i,1}^{10,PP} & a_{i,2}^{10,PP} & \dots & a_{i,NR}^{10,PP} & 0 \\ a_{i,1}^{10,1} & a_{i,2}^{10,1} & \dots & a_{i,NR}^{10,1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1}^{10,P} & a_{i,2}^{10,P} & \dots & a_{i,NR}^{10,PP} & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{linha PP} \\ \\ \\ \\ \text{linha PP + NP} \\ \\ \\ \\ \text{linha PP + NP.PP} \\ \\ \\ \text{linha PP + NP.PP + P} \end{matrix}$$

O índice  $i$  pode variar de 1 até  $NE$ . A última coluna se refere as produções nulas do regime abandono.

A matriz tecnológica  $A$  pode ser então representada de uma forma mais concisa tal como:

$$A = \begin{pmatrix} 1 \dots 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 \dots 1 & 0 \\ M_1 & \dots & M_{NE} & M_0 \end{pmatrix}$$

Uma coluna qualquer de  $A$  pode ser descrita ou por  $\begin{pmatrix} 0 \\ (M_0)_t \end{pmatrix}$  ou por  $\begin{pmatrix} e_i \\ (M_i)_t \end{pmatrix}$ , para

$i=1, \dots, NE$ , sendo que  $(M_0)_t$  é qualquer coluna da matriz  $M_0$  e  $(M_i)_t$  qualquer coluna de  $M_i$ .

A aplicação do GUB para este sistema procede-se da seguinte forma:

Seja  $B$  uma base qualquer. Fazendo-se  $B = \begin{pmatrix} I & C \\ MP & \bar{B} \end{pmatrix}$  onde  $MP$  é a matriz de produção da iteração atual, formada por colunas chamadas chaves, de colunas da matriz  $M_i$ , mostrada na Figura 06,  $\bar{B}$  formada por colunas de  $M_0$  ou  $M_i$  e  $C$  ou é formada por colunas nulas ou colunas da forma do vetor  $e_i$ ,  $e_i^T = (0 \dots 1 \dots 0)$ , com 1 na posição  $i$ .

Após a transformação, através de  $T$ , definida por (34) o produto  $B.T$  fica:

$$B.T = \begin{pmatrix} I & C \\ MP & \bar{B} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ MP & -MP.C + \bar{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ MP & \underline{B} \end{pmatrix},$$

onde  $\underline{B}$  é chamada de matriz de trabalho.

A matriz inversa da base se transforma em:

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} I + C.BINV.MP & -C.BINV \\ -BINV.MP & BINV \end{pmatrix},$$

sendo  $BINV = \underline{B}^{-1}$  a matriz inversa de trabalho.

Para atualizar uma coluna qualquer  $A_t$  da matriz original  $A$ , faz-se um dos dois tipos de produtos:

$$\text{ou } B^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ (M_0)_t \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad B^{-1} \cdot \begin{pmatrix} e_i \\ (M_i)_t \end{pmatrix}, \text{ conforme (35) da seção 3.2.3.}$$

Cada produto resulta em um tipo particular de vetor, como estão apresentados a seguir. Para o primeiro caso:

$$\begin{pmatrix} I + C \cdot BINV \cdot MP & -C \cdot BINV \\ -BINV \cdot MP & BINV \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ (M_0)_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -C \cdot BINV \cdot (M_0)_t \\ BINV \cdot (M_0)_t \end{pmatrix}$$

Para o segundo caso:

$$\begin{pmatrix} I + C \cdot BINV \cdot MP & -C \cdot BINV \\ -BINV \cdot MP & BINV \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_i \\ (M_i)_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i - C \cdot BINV \cdot ((M_i)_t - (M_{S_i})_t) \\ BINV \cdot ((M_i)_t - (M_{S_i})_t) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} e_i - C \cdot BINV \cdot ADIF \\ BINV \cdot ADIF \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i - \sum_{i \in R(i)} D_s^i \\ D_s \end{pmatrix},$$

onde  $R(i)$  representa o conjunto de índices das outras variáveis que estão no conjunto  $S_i$  essencial, ou apenas o da própria variável se o conjunto  $S_i$  for não - essencial.

A atualização de  $\pi = (MI, PI)$ , conforme (36), é calculada por

$$PI = (c_{Bn} - c_{Bc} \cdot C) \cdot BINV,$$

$$MI = c_{Bc} - PI \cdot MP,$$

sendo  $MP$  a matriz de produções da parte chave.

Os cálculos ficam:

$$PI = c_T \cdot BINV$$

$$MI_i = c_i - PI \cdot (MP)_i, \quad \forall i = 1, \dots, NE,$$

onde  $c_T = (c_{Bn} - c_{Bc} \cdot C)$  é chamado de custo de trabalho e  $(MP)_i$  a coluna correspondente ao estrato  $i$ , da matriz de produções  $MP$ .

O custo de trabalho é calculado fazendo-se a diferença entre o custo da variável  $x_j$  e o custo da variável no mesmo  $S_j$ , porém na parte chave.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

#### 3.3.1 Cálculos para o desenvolvimento do programa RESOLVE.FOR

Seja a matriz tecnológica  $A$  representativa do modelo florestal, apresentada na Figura 04, da seção 3.1.4.

O número de variáveis do modelo foi dividido em 8 grupos, sendo que cada grupo contém as variáveis conforme apresentado na Tabela 02.

TABELA 02 : GRUPOS DE VARIÁVEIS DO MODELO

GRUPO	TIPO DE VARIÁVEIS
1	variáveis de manejo $x_{ij}$ , $i=1,\dots,NE$ , $j=1,\dots,NR$
2	variáveis de folga de área $FA_i$ , $i=1,\dots,NE$
3	variáveis de compra de madeira para processo $CMP_k$ , $k=1,\dots,PP$
4	variáveis de folga de compra de madeira para processo $FCMP_k$ , $k=1,\dots,PP$
5	variáveis de venda $V_{lk}$ , $l=1,\dots,NP$ , $k=1,\dots,PP$
6	variáveis de folga de capacidade produtiva $FCP_{lk}$ , $l=1,\dots,NP$ , $k=1,\dots,PP$
7	variáveis artificiais $VA_{lk}$ , $l=1,\dots,NP$ , $k=1,\dots,PP$
8	variáveis de folga de volume global máximo explorado $FVMAX_k$ , $k=1,\dots,P$

O vetor  $IBASE$  de mesma dimensão da base  $B$ ,  $DB$ , informa o grupo ao qual pertence cada variável que está na base. Portanto  $IBASE(m)$ , para  $m = 1,\dots,DB$ , pode assumir qualquer valor de 1 a 8.

O vetor  $INDI$  representa o índice da variável que está na base, em relação ao seu grupo. Então, para qualquer  $m$  entre 1 e  $DB$ :

se  $IBASE(m)=1$  então  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $NE.NR$ ;

se  $IBASE(m)=2$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $NE$ ;

se  $IBASE(m)=3$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $PP$ ;

se  $IBASE(m)=4$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $PP$ ;

se  $IBASE(m)=5$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $NP.PP$ ;

se  $IBASE(m)=6$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $NP.PP$ ;

se  $IBASE(m)=7$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $NP.PP$ ;

se  $IBASE(m)=8$ ,  $INDI(m)$  pode variar de 1 até  $P$ .

Através dos vetores  $IBASE$  e  $INDI$ , pode-se identificar qualquer variável que está na base, com todas suas características.

Assim, se  $IBASE(m)=1$ ,  $INDI(m)=n$ , então a variável é de manejo e se refere ao estrato  $i$  obtido por  $i = \text{int}\left(\frac{n-1}{NR}\right) + 1$  e ao regime de manejo  $j$ ,  $j = n - \text{int}\left(\frac{n-1}{NR}\right) \cdot NR$ , sendo que  $\text{int}(\Theta)$  representa a parte inteira de  $\Theta$ .

Se  $IBASE(m)=2$ ,  $INDI(m)=n$ , a variável é de folga de área, representando a quantidade em ha, do estrato  $n$  que é 'abandonado'.

Se  $IBASE(m)=3$ ,  $INDI(m)=n$ , a variável é de compra de madeira para processo em metros cúbicos, no período  $n$ .

Se  $IBASE(m)=4$ ,  $INDI(m)=n$ , a variável representa o quanto foi deixado de comprar de madeira para processo em metros cúbicos, no período  $n$ , em relação ao valor máximo permitido.

Se  $IBASE(m)=5$ ,  $INDI(m)=n$ , então a variável é de venda, do produto  $l$  num determinado período  $k$ , em metros cúbicos. O produto  $l$  e o período  $k$  podem ser obtidos por

$$l = n - \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) \cdot NP \quad \text{e} \quad k = \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) + 1.$$



Se  $IBASE(m)=6$ ,  $INDI(m)=n$ , então a variável é de folga de capacidade produtiva relativa à restrição de demanda do produto  $l$ , num determinado período  $k$ . O produto  $l$  pode ser obtido por  $l=n - \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) \cdot NP$  e o período da folga  $k$  por  $k = \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) + 1$ .

Se  $IBASE(m)=7$ ,  $INDI(m)=n$ , então a variável é do tipo artificial, que foi acrescentada na restrição de demanda do produto  $l$ , num determinado período  $k$ , a fim de se obter uma solução básica inicial. O produto  $l$  e o período  $k$  podem ser obtidos por  $l=n - \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) \cdot NP$  e  $k = \text{int}\left(\frac{n-1}{NP}\right) + 1$ .

Se  $VA_{jk}$  ficar na base ótima com valor positivo, significa que a produção do produto  $l$  não atendeu a demanda específica, parcial ou global do produto, dependendo do valor de  $l$  e do período  $k$ .

Se  $IBASE(m)=8$ ,  $INDI(m)=n$ , então a variável representa a quantidade em  $m^3$ , que ainda poderia ser cortada de madeira, durante o período  $n$ , sem atingir o limite estipulado de corte máximo global.

Uma base inicial foi definida com as seguintes variáveis :  $FA$ ,  $FCMP$ ,  $VA$  e  $FVMAX$ .

A base inicial é a identidade  $I$  e tem a dimensão  $NE+PP+NP.PP+P$  e os vetores iniciais de  $IBASE$  e  $INDI$  são:

$$IBASE = (2, \dots, 2, 4, \dots, 4, 7, \dots, 7, 8, \dots, 8),$$

$$INDI = (1, \dots, NE, 1, \dots, PP, 1, \dots, NP.PP, 1, \dots, P).$$

Foram definidas duas matrizes, chamadas de  $AJ1$  e  $AJ2$ , que contêm os dados de produção das variáveis de manejo que estão na parte chave e não - chave da base, respectivamente.

Inicialmente não há nenhuma variável de manejo na base, portanto tanto  $AJ1$  como  $AJ2$  são nulas.

A dimensão de  $AJ1$  é  $(PP+(1+NP).NCORMAX+P) \times NE$  e a matriz tem a forma

$$AJ1^T = \left( 0 \quad anok_1 \quad a_{ij}^{1k_1} \quad \dots \quad a_{ij}^{10k_1} \quad \dots \quad anok_2 \quad a_{ij}^{1k_2} \quad \dots \quad a_{ij}^{10k_2} \quad a_{ij}^{10,1} \quad \dots \quad a_{ij}^{10,P} \right),$$

onde  $NCORMAX$  representa o número máximo de desbastes e cortes rasos que podem ocorrer em qualquer estrato durante todo o período de planejamento.

$AJ2$  tem dimensão  $(PP+(1+NP).NCORMAX+P) \times (DB-NE)$  e tem mesma composição que  $AJ1$ .

A cada iteração, conforme variáveis de manejo entrem na parte chave ou não - chave, as matrizes  $AJ1$  e  $AJ2$  vão alterando. Observe-se que os dados de produção são representados de uma forma não - esparsa, isto é, o  $anok_l$  representa o ano que tem corte e  $a_{ij}^{lk}$  a produção máxima do produto  $l$  no referido ano.

Calculado o valor inicial da  $FO$  é feita uma busca do maior valor de  $(c_N - c_B \cdot B^{-1} \cdot N)$  por blocos. Foi utilizado o critério de 'Partial-Pricing', sendo que a busca é feita em cada arquivo de produção por vez.

O valor do custo reduzido é calculado de maneira particular, dependendo do grupo ao qual a variável pertença. O cálculo é feito por  $(c_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_j)$ , onde  $c_j$  é o custo original da variável  $x_j$  não - básica e  $A_j$  a coluna original respectiva, na matriz tecnológica.

Seja  $c_j - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_j = c_j - \pi \cdot A_j = c_j - (MI, PI) \cdot A_j$  onde  $MI$  é o vetor dos multiplicadores relativos à parte chave e  $PI$  relativo à parte não - chave.

Cada coluna  $A_j$  da matriz tecnológica  $A$  pode ser representada em quatro partes, relativas ao tipo de restrição representadas na mesma. Então qualquer coluna é da forma

$$A_j^T = (\text{coef. de area} \mid \text{coef. de compra} \mid \text{coef. de demandas} \mid \text{coef. vol. max.}).$$

A atualização do custo relativo para cada grupo é feita como a seguir:

1. A variável  $x_{ij}$  é de manejo do estrato  $i$ , regime  $j$ .

Uma coluna qualquer da matriz tecnológica, associada a esta variável é da forma

$$A_{ij}^T = (0 \dots 1 \dots 0 \mid 0 \mid a_{ij}^{1,1} \dots a_{ij}^{10,1} \dots \dots a_{ij}^{1,PP} \dots a_{ij}^{10,PP} \mid a_{ij}^{10,1} \dots a_{ij}^{10,P}), \text{ com } 1 \text{ na}$$

posição do estrato  $i$ , das restrições de área. Então:

$$c_{ij\text{atual}} = c_{ij} - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_{ij} = c_{ij} - (MI, PI) \cdot A_{ij} =$$

$$c_{ij\text{atual}} = c_{ij} - MI_i - \sum_{k=1}^{PP} \sum_{l=1}^{NP} PI_{PP+NP(k-1)+l} \cdot a_{ij}^{lk} - \sum_{k=1}^P PI_{PP+NP.PP+k} \cdot a_{ij}^{10,k}.$$

2. A variável  $FA_i$  é de folga de área do estrato  $i$ .

Uma coluna qualquer é da forma  $A_i^T = (0 \dots 1 \dots 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0)$ , com 1 na

posição do estrato  $i$ , das restrições de área. Portanto:

$$c_{i\text{atual}} = c_i - c_B \cdot B^{-1} \cdot A_i = c_i - (MI, PI) \cdot A_i = c_i - MI_i.$$

3. A variável é de compra de madeira para processo,  $CMP_k$ , no ano de compra  $k$ .

Uma coluna típica é da forma  $A_k^T = (0 \mid \dots 1 \dots \mid \dots 1 \ 1 \ \dots \mid 0)$ , com 1 na

posição do período  $k$  das restrições de compra e 1 nas posições 9 e 10, do período de

compra  $k$  das restrições de demanda, sendo que:

$$c_{k_{atual}} = c_k - (MI, PI) \cdot A_k = -PC_k - PI_k - PI_{PP+(9+NP.(k-1))} - PI_{PP+(10+NP.(k-1))}.$$

4. A variável é de folga de compra de madeira para processo,  $FCMP_k$ , relativa ao ano de compra  $k$ .

Uma coluna qualquer é da forma  $A_k^T = (0 \mid \dots 1 \dots \mid 0 \mid 0)$ , com 1 na posição do ano  $k$  das restrições de compra de madeira para processo.

$$\text{Neste caso, } c_{k_{atual}} = c_k - (MI, PI) \cdot A_k = -PI_k.$$

5. A variável  $V_{lk}$  é de venda a terceiros, do produto  $l$ , no ano  $k$ .

Se o produto considerado é  $l=1, 5$  ou  $9$  então uma coluna típica é da forma  $A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots \dots -1 \dots -1 \dots \mid 0)$ , com  $-1$  nas posições  $l$  e  $l=10$ , do ano de venda  $k$ , nas restrições de demanda, sendo que o cálculo do custo reduzido fica:

$$c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PV_{lk} + PI_{PP+(k-1).NP+l} + PI_{PP+(k-1).NP+10}.$$

Para os produtos  $l=4$  ou  $8$ , uma coluna qualquer é da forma

$$A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots -1 -1 -1 -1 \dots -1 \dots \mid 0), \text{ com o valor } -1 \text{ nas posições}$$

$l, l-1, l-2, l-3$  e  $l=10$ , do ano de venda  $k$ , das restrições de demanda. O cálculo do custo:

$$c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PV_{lk} + PI_{PP+(k-1).NP+l} + PI_{PP+(k-1).NP+(l-1)} + \\ + PI_{PP+(k-1).NP+(l-2)} + PI_{PP+(k-1).NP+(l-3)} + PI_{PP+(k-1).NP+10}.$$

Se os produtos forem o  $l=3$  ou  $7$ , uma coluna qualquer é da forma

$$A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots -1 -1 -1 \dots -1 \dots \mid 0), \text{ com } -1 \text{ nas posições } l, l-1, l-2 \text{ e}$$

$l=10$ , do ano de venda  $k$ , das restrições de demanda. O cálculo do custo fica:

$$c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PV_{lk} + PI_{PP+(k-1).NP+l} + PI_{PP+(k-1).NP+(l-1)} + \\ + PI_{PP+(k-1).NP+(l-2)} + PI_{PP+(k-1).NP+10}.$$

Para  $l=2$  ou  $6$  uma coluna típica qualquer é da forma

$$A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots \mid -1 \mid -1 \mid \dots \mid -1 \mid \dots \mid 0), \text{ com } -1 \text{ nas posições } l, l-1 \text{ e } l=10,$$

do ano de venda  $k$ , das restrições de demanda. O cálculo do custo fica

$$c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PV_{lk} + PI_{PP+(k-1).NP+l} + PI_{PP+(k-1).NP+(l-1)} + PI_{PP+(k-1).NP+10}.$$

Para o produto  $l=10$ , uma coluna qualquer é da forma

$$A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots \mid \dots \mid -1 \mid \dots \mid 0), \text{ com } -1 \text{ na posição } l=10, \text{ do ano de venda } k,$$

na restrição de demanda.

Assim sendo, o valor do custo reduzido fica

$$c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PV_{lk} + PI_{PP+(k-1).NP+10}.$$

6. A variável  $FCP_{lk}$  é de folga de capacidade produtiva relativa à restrição de demanda do produto  $l$ , no ano  $k$ .

Uma coluna qualquer é da forma  $A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots \mid -1 \mid \dots \mid 0)$ , com  $-1$  na posição  $l$ , do ano  $k$ , de folga de capacidade produtiva, nas restrições de demanda.

$$\text{Tem-se então, } c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = PI_{PP+(k-1).NP+l}.$$

7. A variável  $VA_{lk}$  é artificial, relativa à restrição de demanda do produto  $l$ , no ano  $k$ .

Uma coluna qualquer é da forma  $A_{lk}^T = (0 \mid 0 \mid \dots \mid 1 \mid \dots \mid 0)$  com  $1$  na posição  $l$ , do ano  $k$ , da restrição de demanda.

O valor do custo fica  $c_{lk_{atual}} = c_{lk} - (MI, PI) \cdot A_{lk} = -M - PI_{PP+(k-1).NP+l}$ .

8. A variável é de  $FVMAX_k$  é de folga no volume máximo permitido para corte no período  $k$ .

Uma coluna qualquer é da forma  $A_k^T = (0 \mid 0 \mid 0 \mid \dots \mid 1 \mid \dots)$ , com 1 na posição  $k$ , das restrições de controle de volume máximo global e

$$c_{k_{atual}} = c_k - (MI, PI) \cdot A_k = -PI_{PP+PP.NP+k}$$

No programa é feito a escolha do maior  $c$  para as variáveis dos grupos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e grupo 1, bloco  $i$ , sendo  $i$  qualquer valor de 1 até 8.

Caso o maior  $c$  seja negativo, procura-se no bloco seguinte do grupo 1 e assim por diante.

Caso se encontre algum  $c_n > 0$  a variável associada  $x_n$  entra na base. Caso todos os blocos sejam testados e todos os  $c$ 's sejam negativos, a solução ótima foi encontrada.

Se algum  $c_n > 0$ , sua coluna correspondente na matriz tecnológica tem que ser atualizada. A atualização de  $A_n$  é feita dependendo do grupo ao qual a variável associada à coluna pertença.

A atualização é feita por  $A_{n_{atualizada}} = B^{-1} \cdot A_n$ . Usando o GUB e sendo

$$B = \begin{pmatrix} I & C \\ MP & \underline{B} \end{pmatrix} \text{ uma base qualquer, } BT = \begin{pmatrix} I & 0 \\ MP & \underline{B} \end{pmatrix} \text{ onde } \underline{B} = \bar{B} - MP \cdot C \text{ e}$$

$$MP = ((M_1)_{i1} \dots (M_{NE})_{iNE}), \text{ onde } (M_i)_{il} \text{ é uma coluna qualquer de } M_i \text{ e } (M_{NE})_{iNE} \text{ é}$$

uma coluna qualquer de  $M_{NE}$ . A atualização da coluna  $A_n$  é obtida por

$B.A_{n_{atualizada}} = A_n$ , fazendo  $A_{n_{atualiz.}} = T.Z \Rightarrow B.T.Z = A_n$  ou:

$$\begin{pmatrix} I & 0 \\ MP & B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{NE} \\ \dots \\ z_{NE+1} \\ \dots \\ z_{DB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \\ \dots \\ A_n^{NE+1} \\ \dots \\ A_n^{DB} \end{pmatrix}$$

onde  $A_n$  é a coluna que vai entrar na base.

As primeiras posições da coluna têm mesma dimensão da parte chave,  $NE$ , e as restantes,  $DB-NE$ , da parte não - chave da base. Portanto, as primeiras posições da coluna serão chamadas de parte chave e as restantes de parte não - chave da coluna.

Resolvendo o sistema anterior, onde  $ASP$  representa a parte não - chave da coluna que vai entrar na base, tem-se a solução seguinte:

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{NE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} z_{NE+1} \\ \dots \\ z_{DB} \end{pmatrix} = \underline{B}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} A_n^{NE+1} \\ \dots \\ A_n^{DB} \end{pmatrix} - MP \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{NE} \end{pmatrix} = BINV \cdot (ASP - AS1).$$

Se a coluna que vai entrar não é de manejo,  $AS1=0$ , pois neste caso

$$\begin{pmatrix} z_1 & \dots & z_{NE} \end{pmatrix}^T = 0 \Rightarrow AS1 = \left( (M_1)_{i1} \quad \dots \quad (M_{NE})_{iNE} \right) \cdot 0 = 0.$$

$AS1 = (M_i)_t$ , se a coluna que vai entrar é de manejo, inclusive ‘abandono’, associado ao estrato  $i$ , pois neste caso:

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{NE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \\ 1 \\ \dots \end{pmatrix} \Rightarrow AS1 = \left( (M_1)_{i1} \quad \dots \quad (M_{NE})_{iNE} \right) \cdot \begin{pmatrix} \dots \\ 1 \\ \dots \end{pmatrix} = (M_i)_t,$$

onde  $(M_i)_t$  é a coluna de produção que está na parte chave, associada ao estrato  $i$ , da matriz

$M_i$ . Então:

$$Z = \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \\ \dots \\ \text{---} \\ \text{BINV} \cdot (\text{ASP} - \text{AS1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \\ \dots \\ \text{---} \\ \text{BINV} \cdot \text{ADIF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \\ \dots \\ \text{---} \\ D \end{pmatrix}$$

e a coluna atualizada é calculada por:

$$A_{n\text{atualizada}} = T \cdot Z = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \\ \dots \\ \text{---} \\ D \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} A_n^1 \\ \dots \\ A_n^{NE} \end{pmatrix} - C \cdot D}{D}.$$



Para cada tipo de coluna tem-se uma atualização específica, como a seguir.

Caso 1)  $A_n$  é do grupo 1, coluna de manejo associada ao estrato  $i$ .

Neste caso  $D = BINV \cdot ADIF = BINV \cdot (ASP - AS1)$  onde

$$ASP^T = \left( 0 \mid \dots a_{ij_1}^{1k} \dots \mid \dots a_{ij_1}^{10k} \dots \right) \text{ e } AS1^T = \left( 0 \mid \dots a_{ij_2}^{1k} \dots \mid \dots a_{ij_2}^{10k} \dots \right).$$

$ASP$  é a parte não - chave da coluna que vai entrar na base e  $AS1$  é a parte não - chave da coluna de manejo ou 'abandono' que está na parte chave da base, associada ao mesmo estrato  $i$ .

Se o manejo é abandono então  $AS1=0$ .

A coluna atualizada fica da forma :

$$A_{n\text{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ 1 - \sum_{t \in R(i)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

onde  $R(i)$  representa o conjunto de índices das variáveis que estão no conjunto  $S_i$ , essencial ou não, associado ao estrato  $i$ .

Caso 2)  $A_n$  é do grupo 2, coluna de folga de área relativa ao estrato  $i$ .

Neste caso  $ASP=0$  e  $AS1^T = (0 \mid \dots \alpha_{ij}^{lk} \dots \mid \dots \alpha_{ij}^{10k} \dots)$ , sendo que o vetor

$D$  é obtido por  $D = BINV \cdot (0 - AS1) = -BINV \cdot AS1$  e

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ 1 - \sum_{t \in R(i)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Caso 3)  $A_n$  é do grupo 3, coluna de compra de madeira para processo, no período  $k$ .

Como a coluna não é de manejo,  $AS1=0$  e  $ASP$  igual a  $ASP^T = (0 \dots 1 \dots 0 \mid \dots \dots 1 \ 1 \ \dots \mid 0)$ , com 1 na posição  $k$  do ano de compra nas restrições de compra de madeira e também nas posições dos produtos  $l=9$  e  $l=10$ , do ano  $k$ , nas restrições de demanda.

Neste caso o cálculo do vetor  $D$  é feito através do produto  $D=BINV \cdot (ASP-AS1) = BINV \cdot ASP = BINV(\cdot, k) + BINV(\cdot, PP+(NP \cdot k-1)) + BINV(\cdot, PP + NP \cdot k)$  onde:

$BINV(\cdot, k)$  representa a coluna  $k$  da matriz inversa de trabalho ;

$BINV(\cdot, PP+(NP \cdot k-1))$  representa a coluna  $PP +$  posição do produto processo ( $l=9$ ), no período de compra  $k$  ;

$BINV(\cdot, PP + l + NP \cdot (k-1)) = BINV(\cdot, PP + NP \cdot k)$ , quando  $l = NP$ .

Daí a coluna atualizada fica da forma :  $A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} =$

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Caso 4)  $A_n$  é do grupo 4, folga de compra de madeira para processo ocorrido no período  $k$ .

Como a coluna não é de manejo,  $AS1=0$  e  $ASP$  igual a  $ASP^T = (0 \dots 1 \dots 0 \mid 0 \mid 0)$ , com 1 na posição  $k$  do ano de folga de compra nas restrições de compra de madeira.

Tem-se ainda  $D = BINV \cdot (ASP - AS1) = BINV \cdot ASP = BINV(\dots, k)$  onde  $BINV(\dots, k)$  representa a coluna  $k$  da matriz inversa de trabalho. Daí, a coluna atualizada fica da forma:

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Caso 5)  $A_n$  é do grupo 5, venda do produto  $l$  a terceiros, no período  $k$ .

Como a coluna não é de manejo,  $AS1=0$ . Dependendo do produto a ser considerado a coluna  $A_n$  varia, isto é,  $ASP$  toma formas diferentes.

Se  $l = 1, 5$  ou  $9$  então  $ASP^T = \left( 0 \mid \dots \dots -1 \dots -1 \dots \mid 0 \right)$ , com  $-1$  nas posições  $l$  e  $l=10$ , do período  $k$ , nas restrições de demanda. Portanto,  $D = BINV \cdot ASP = -BINV(\cdot, PP+(k-1).NP + l) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+10)$  onde  $BINV(\cdot, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho .

Se  $l = 4$  ou  $8$  então  $ASP^T = \left( 0 \mid \dots \dots -1 -1 -1 -1 \dots -1 \mid 0 \right)$ , com  $-1$  nas posições  $l, l-1, l-2, l-3$  e  $l=10$ , do período  $k$ , nas restrições de demanda. Portanto,  $D = BINV \cdot ASP = -BINV(\cdot, PP+(k-1).NP + l) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+(l-1)) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+(l-2)) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+(l-3)) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+10)$  onde  $BINV(\cdot, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho .

Para os casos  $l = 3$  e  $7$  e  $l = 2$  e  $6$ , a situação é análoga.

Para  $l=3$  ou  $7$  o vetor  $D$  é dado por  $D = BINV \cdot ASP = -BINV(\cdot, PP+(k-1).NP + l) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+(l-1)) - BINV(\cdot, PP + (k-1).NP + (l-2)) - BINV(\cdot, PP + (k-1).NP + 10)$  para  $ASP$  igual ao vetor  $ASP^T = \left( 0 \mid \dots -1 -1 -1 \dots -1 \dots \mid 0 \right)$ , com  $-1$  nas posições  $l, l-1, l-2$  e  $l=10$ .

Para  $l=2$  ou  $6$ , tem-se  $D = BINV \cdot ASP = -BINV(\cdot, PP + (k-1). NP + l) - BINV(\cdot, PP + (k-1).NP+(l-1)) - BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+10)$ , com  $-1$  nas posições  $l, l-1$  e  $l=10$ , do vetor  $ASP^T = \left( 0 \mid \dots -1 -1 \dots -1 \dots \mid 0 \right)$ .

Se  $l = 10$  então  $ASP^T = \left( 0 \mid \dots \dots -1 \dots \mid 0 \right)$ , com  $-1$  na posição  $l=10$ , do período  $k$ , nas restrições de demanda.

Portanto,  $D = BINV \cdot (ASP - AS1) = BINV \cdot ASP = -BINV(\cdot, PP+(k-1).NP+10)$  onde  $BINV(\cdot, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho.

Em qualquer uma das cinco situações, a coluna atualizada fica da forma :

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Caso 6)  $A_n$  é do grupo 6, folga de capacidade produtiva da restrição de demanda do produto  $l$  no período  $k$ .

Neste caso tem-se  $AS1=0$  e  $ASP^T = (0 \mid \dots \dots -1 \dots \mid 0)$ , com  $-1$  na posição  $l$ , do período  $k$ , na restrição de demanda. Portanto,  $D = BINV.(ASP-AS1) = BINV.ASP = -BINV(\dots, PP+(k-1).NP + l)$  onde  $BINV(\dots, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho.

A coluna atualizada fica da forma :

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Caso7)  $A_n$  é do grupo 7, variável artificial associada à restrição de demanda do produto  $l$ , no período  $k$ .

$AS1=0$  e  $ASP^T = (0 \mid \dots \mid \dots \mid 1 \dots \mid \dots \mid 0)$ , com 1 na posição  $l$ , do período  $k$ , na restrição de demanda.

Portanto,  $D = BINV.(ASP - AS1) = BINV.ASP = BINV(\dots, PP + (k-1).NP + l)$  onde  $BINV(\dots, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho. A coluna atualizada fica da

$$\text{forma : } A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}.$$

Caso 8)  $A_n$  é do grupo 8, folga de volume máximo global ocorrido no período  $k$ .

Neste caso,  $AS1=0$  e  $ASP$  é da forma  $ASP^T = (0 \mid 0 \mid \dots \mid 1 \dots)$ , com 1 na posição do período  $k$ , quando há controle de volume máximo de corte.

O cálculo de  $D = BINV.(ASP - AS1) = BINV.ASP = BINV(\dots, PP + NP.PP + k)$  onde  $BINV(\dots, @)$  representa a coluna  $@$  da matriz inversa de trabalho.

A coluna atualizada fica da forma :

$$A_{n_{atualizada}} = \begin{pmatrix} I & -C \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{t \in R(1)} D_t \\ \dots \\ - \sum_{t \in R(NE)} D_t \\ \dots \\ D_1 \\ \dots \\ D_{DB-NE} \end{pmatrix}$$

Após a atualização da coluna que vai entrar na base é feito o cálculo do bloqueio. Dependendo da posição que a variável que vai sair da base ocupa podem ocorrer duas situações diferentes:

- $RSAI > NE$  ;
- $RSAI \leq NE$  .

Para a última situação faz-se duas considerações:

- a variável que está entrando pertence a um conjunto essencial;
- a variável que está entrando não pertence a um conjunto essencial.

Cada situação é trabalhada conforme a argumentação feita na seção 3.2.3 .

### 3.3.2 Programa computacional : RESOLVE.FOR

Com base no modelo apresentado na seção 3.1.4, no método Simplex Revisado apresentado na seção 3.2.2 e o GUB da seção 3.2.4, foi desenvolvido o programa RESOLVE.FOR, levando em conta todas as considerações feitas na seção anterior 3.3.1, relativas ao desenvolvimento computacional. O programa foi feito na linguagem FORTRAN, usando o FORTRAN POWER STATION, da Microsoft, versão 1.0 profissional.

Na execução do programa RESOLVE.FOR, caso o modelo seja infactível algumas variáveis artificiais,  $VA$ ' s, ficam na base ótima, com valor maior que zero.

Quando o PL é infactível significa que pelo menos uma  $VA$  ficou na base com valor positivo e alguma demanda de algum produto não foi atendida em algum período, porém não querendo dizer que a empresa vai auferir lucro zero ou que o PL não tenha solução real.

Nestes casos o PL foi tratado da forma seguinte:

1° ) Inicialmente permitem-se infactibilidades da ordem de  $1 \text{ m}^3$ , isto é, se  $VA \leq 1$  considera-se o PL factível.

2°) Caso contrário, se houver alguma  $VA$  com valor maior que 1, factibiliza-se o PL, em uma nova execução, através da compra do produto  $l$  que faltou no período  $k$ , da seguinte forma:

- acrescenta-se na  $FO$  o valor dos custos das  $r$  variáveis  $VA$ 's que tinham sido descontados

$$FO_{\text{atualizado1}} = FO + M \cdot VA_1 + \dots + M \cdot VA_r;$$

- subtrai-se o custo de compra de  $VA_{lk}$  com uma penalidade de 20% em relação ao preço de venda da forma:

$$FO_{\text{atualizado2}} = FO_{\text{atualizado1}} - 1,20 \cdot PV_{lk1} \cdot VA_1 - \dots - 1,20 \cdot PV_{lkr} \cdot VA_r;$$

- as operações anteriores equivalem a resolver o mesmo PL, porém com aquelas variáveis artificiais com custo alterado de  $c = -M$  para  $c = -1,2 \cdot PV$ .

A factibilidade do PL é mantida pois a região factível não foi alterada, porém nesta mudança nada garante que a otimalidade é garantida.

Uma forma de testar a otimalidade é através do recálculo dos custos reduzidos, após a alteração dos custos das  $VA$ 's da base, isto é, depois de factibilizar o problema através da compra do produto  $l$ , no período  $k$ .

Então troca-se  $c_B$  de  $VA_{lk} = -M$  por  $c_B$  de  $VA_{lk} = -1,20 \cdot PV_{lk}$ .

Recalcula-se  $\pi = c_B \cdot B^{-1} = (MI, PI)$  pois  $c_B$  alterou. Neste caso, só é necessário calcular  $PI = c_{BT} \cdot BINV$ .

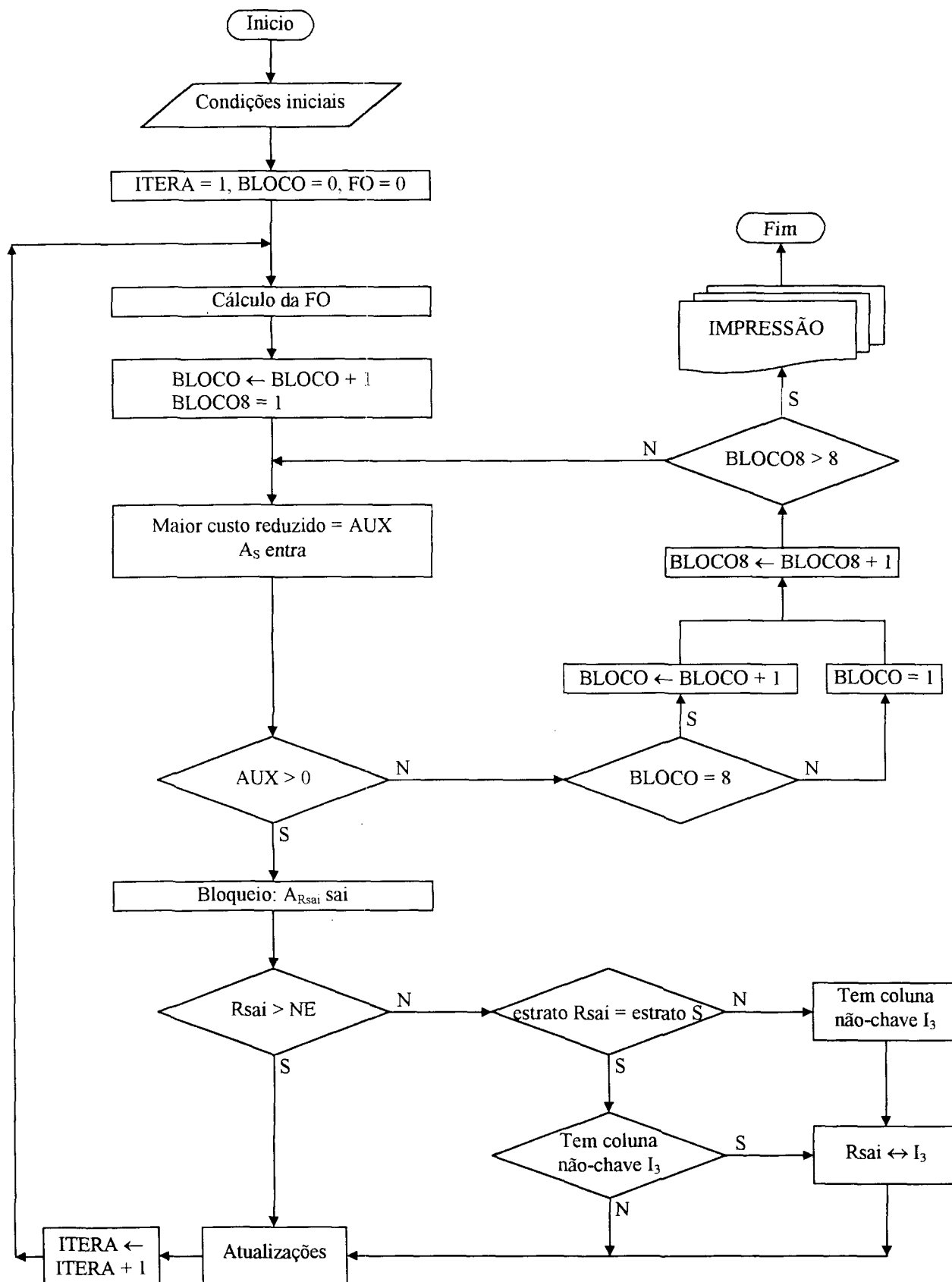
Atualizam-se os custos reduzidos  $c_j - \pi \cdot A_j$  e testa-se se alguma outra variável quer entrar na base.

Se  $c_j - \pi \cdot A_j > 0$ , para algum  $j$  fora da base então continua-se a otimização, com o problema factibilizado através da compra do produto  $l$ , no período  $k$ .

O fluxograma do programa RESOLVE.FOR está representado na Figura 07.



FIGURA 07: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA RESOLVE.FOR



### 3.4 DADOS UTILIZADOS NO MODELO BÁSICO

O modelo de planejamento desenvolvido na seção 3.1.4 foi executado, utilizando-se dados da empresa Pisa Florestal S. A. em aproximadamente 13.000 ha, que representa parte de seu reflorestamento de *Pinus taeda*.

Foram considerados 80 estratos, distribuídos em 5 regiões de diferentes distâncias médias ao centro de operações, onde está localizada a administração e a fábrica de papel, com no máximo 12 regimes por estrato. O número possível de regimes por estrato depende da idade do mesmo e das atividades já desenvolvidas no estrato até então.

O modelo contempla os 10 produtos citados na seção 3.1.2.3.

O planejamento foi desenvolvido para um horizonte de 30 anos com períodos de um ano. Os primeiros 5 anos de planejamento possuem controle de volume de corte.

Para cada estrato o número máximo de explorações (*NCORMAX*), entre desbastes e cortes rasos, durante todos os 30 anos de planejamento é de 5.

A matriz tecnológica *A* para este caso tem dimensão 415 x 1925, o que significa que o PL tem 1925 variáveis de decisão e 415 restrições, distribuídos conforme a matriz da Figura 08.

A base inicial usada no Simplex é formada pelas variáveis *FA*, *FCMP*, *VA* e *FVMAX*.

Os dados utilizados na formação do modelo estão representados na forma de arquivos, cuja utilização está representada na Tabela 03.

Foram selecionados diversos projetos representativos da empresa considerada. Estes projetos foram agrupados em 80 estratos, através de homogeneidade de condições tais como: idade, índice de sítio *IS*, densidade inicial de plantio, região, ser podado ou não.

FIGURA 08: DIMENSÃO DA MATRIZ TECNOLÓGICA PARA O ESTUDO DE CASO E POSIÇÃO DAS VARIÁVEIS.

$$A = \begin{pmatrix} 880 & 80 & 30 & 30 & 300 & 300 & 300 & 5 \\ x & FA & CMP & FCMP & V & FCP & VA & FVMAX \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 30 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 300 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 5 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

TABELA 03 : ARQUIVOS DE DADOS UTILIZADOS NO PROGRAMA RESOLVE.FOR

ARQUIVOS	UTILIZAÇÃO
AREA2.FOR	restrições de área
VCP4.FOR	restrições de volume máximo de compra de madeira para processo
DEMAN2.FOR	restrições de demanda
VX2.FOR	restrições de volume máximo a ser explorado durante os $P$ primeiros períodos de planejamento
CUSTO22.FOR	para formar os custos de manejo na $FO$
PREC.FOR	para a formação dos preços de venda e de compra na $FO$
CPESP22i.FOR	dados de produção específicos para cada estrato e regime
CPRO22i.FOR	dados de produção máximos para cada estrato e regime, para serem usados nas restrições de demanda e volume máximo global.
VT.FOR	contém os valores terminais associados a cada estrato e regime

Os 80 estratos foram subdivididos em grupos de 10, a fim de que as informações de dados de produção específicos e máximos, segundo os 11 regimes considerados fossem guardados em 8 arquivos chamados de CPESP22i.FOR e CPRO22i.FOR, respectivamente, para  $i=1, \dots, 8$ . Os arquivos CPESP221.FOR e CPRO221.FOR contêm as informações de todos os estratos podados e os demais, para  $i=2, \dots, 8$ , dos estratos não-podados.

As áreas consideradas no estudo de caso, disponíveis por região, característica, classe de sítio e densidade de plantio estão distribuídas de acordo com a Tabela 04.

A contribuição percentual de estratos podados e não-podados de cada região em relação ao total da área considerada pode ser observada na Tabela 05.

A floresta não está regulada como se observa na distribuição dos estratos, por idade na Tabela 06 e na Figura 09.

Não se consideraram restrições de regulação, pois espera-se que com uma demanda contínua e constante, as decisões de exploração levem naturalmente a uma regulação da floresta, sem especificamente explicitar tais restrições.

TABELA 04: REPRESENTATIVIDADE DAS ÁREAS DOS ESTRATOS PODADOS E NÃO-PODADOS, EM FUNÇÃO DA REGIÃO, DA CLASSE DE SÍTIO E DA DENSIDADE DE PLANTIO

Região	Classe de sítio	Densidade de plantio	Podados (hectares)	Não-podado (hectares)	Subtotal (hectares)
1	1	1	0,0	89,6	<b>89,6</b>
1	1	2	0,0	99,2	<b>99,2</b>
1	2	1	0,0	591,1	<b>591,1</b>
1	2	2	0,0	127,7	<b>127,7</b>
1	3	1	0,0	1.753,4	<b>1.753,4</b>
1	3	2	0,0	581,8	<b>581,8</b>
1	4	1	48,2	0,0	<b>48,2</b>
1	4	2	0,0	84,4	<b>84,4</b>
<b>Total 1</b>			<b>48,2</b>	<b>3.327,2</b>	<b>3.375,4</b>

Região	Classe de sítio	Densidade de plantio	Podados (hectares)	Não-podado (hectares)	Subtotal (hectares)
2	1	1	82,7	227,7	310,4
2	1	2	0,0	151,9	151,9
2	2	1	0,0	1.545,5	1.545,5
2	2	2	0,0	334,0	334,0
2	3	1	9,0	0,0	9,0
2	3	2	0,0	0,0	0,0
2	4	1	0,0	0,0	0,0
2	4	2	0,0	0,0	0,0
<b>Total 2</b>			91,7	2.259,1	<b>2.350,8</b>
3	1	1	0,0	0,0	0,0
3	1	2	0,0	0,0	0,0
3	2	1	0,0	0,0	0,0
3	2	2	0,0	0,0	0,0
3	3	1	0,0	2.276,9	2.276,9
3	3	2	0,0	0,0	0,0
3	4	1	0,0	0,0	0,0
3	4	2	0,0	0,0	0,0
<b>Total 3</b>			0,0	2.276,9	<b>2.276,9</b>
4	1	1	0,0	87,5	87,5
4	1	2	0,0	0,0	0,0
4	2	1	118,0	310,7	428,7
4	2	2	0,0	0,0	0,0
4	3	1	555,2	1.356,0	1.911,2
4	3	2	0,0	0,0	0,0
4	4	1	393,0	514,1	907,1
4	4	2	0,0	0,0	0,0
<b>Total 4</b>			1.066,2	2.268,3	<b>3.334,5</b>
5	1	1	0,0	0,0	0,0
5	1	2	0,0	0,0	0,0
5	2	1	0,0	329,2	329,2
5	2	2	0,0	0,0	0,0
5	3	1	60,7	813,1	873,8
5	3	2	0,0	0,0	0,0
5	4	1	0,0	175,8	175,8
5	4	2	0,0	0,0	0,0
<b>Total 5</b>			60,7	1.318,1	<b>1.378,8</b>
<b>Total global</b>			<b>1.266,8</b>	<b>11.449,6</b>	<b>12.716,4</b>

Nas Figuras 10, 11 e 12 estão representadas as distribuições dos estratos por índice de sítio, por densidade de plantio e por região de exploração, respectivamente

TABELA 05: PERCENTUAL DAS ÁREAS PODADAS E NÃO-PODADAS, POR REGIÃO

Região	Podados	Não-podados	Total
1	0,38%	26,16%	<b>26,54%</b>
2	0,72%	17,76%	<b>18,48%</b>
3	0,00%	17,91%	<b>17,91%</b>
4	8,38%	17,84%	<b>26,22%</b>
5	0,48%	10,37%	<b>10,85%</b>
<b>Total</b>	<b>9,96%</b>	<b>90,04%</b>	<b>100,00%</b>

TABELA 06: DISTRIBUIÇÃO DOS ESTRATOS POR IDADE

Idade	Hectares
0	803,1
1	961,2
2	73,8
3	514,7
4	1742,4
5	1586,5
6	1051,1
7	1702,8
8	997,9
9	82,7
10	0,0
11	0,0
12	0,0
13	0,0
14	0,0
15	0,0
16	392,2
17	122,4
18	485,9
19	359,4
20	67,1
21	32,1
22	484,5
23	807,5
24	512,1

FIGURA 09: DISTRIBUIÇÃO DOS ESTRATOS POR IDADE

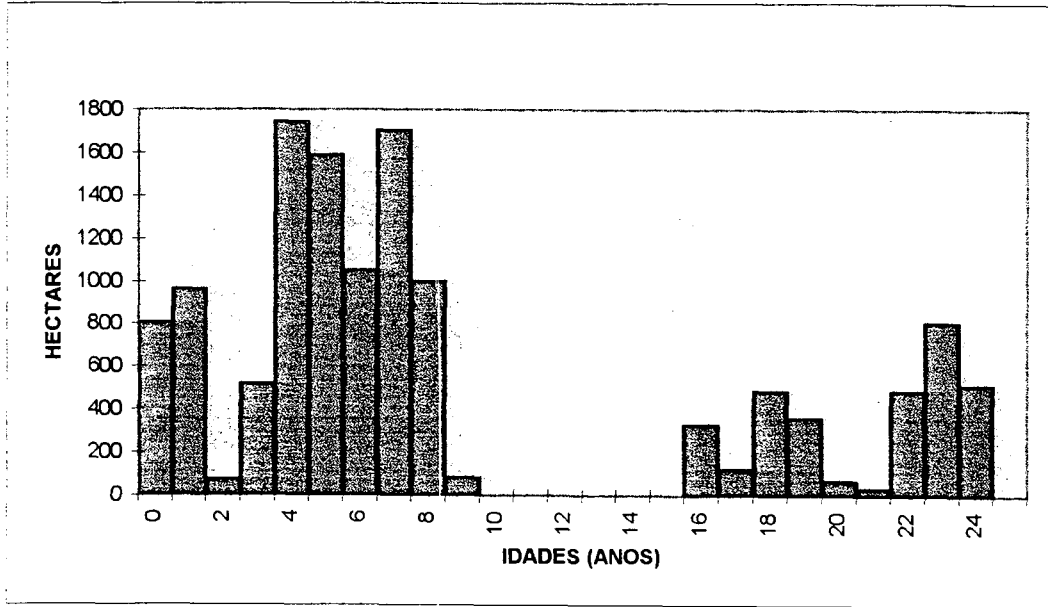


FIGURA 10: DISTRIBUIÇÃO DOS ESTRATOS POR ÍNDICE DE SÍTIO

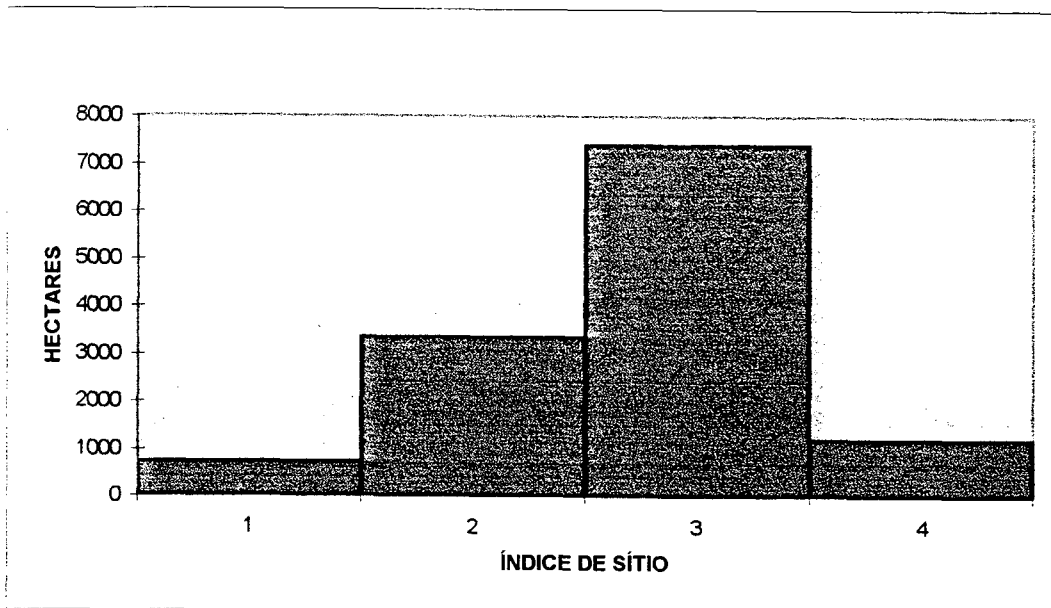


FIGURA 11: DISTRIBUIÇÃO DOS ESTRATOS POR DENSIDADE DE PLANTIO

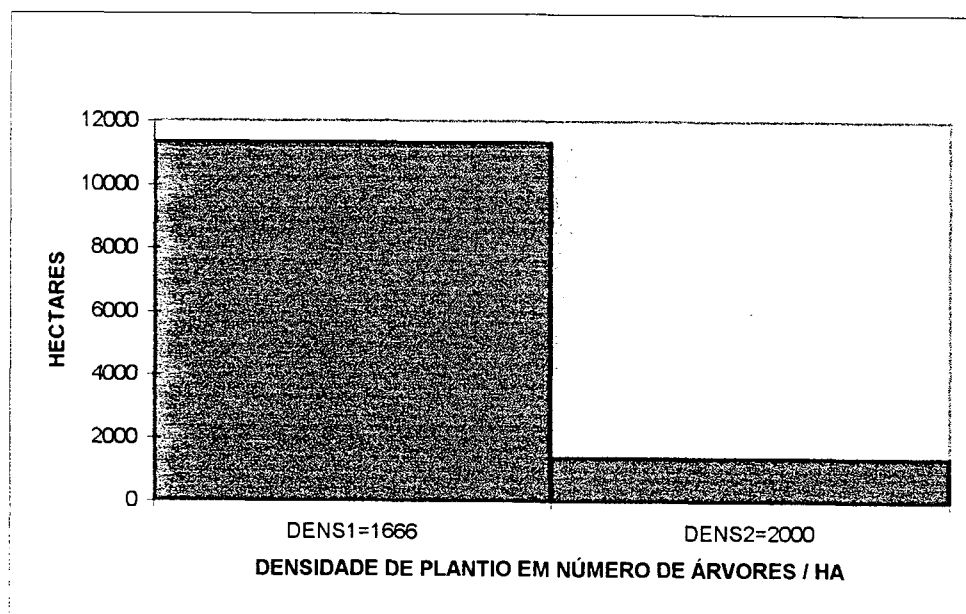
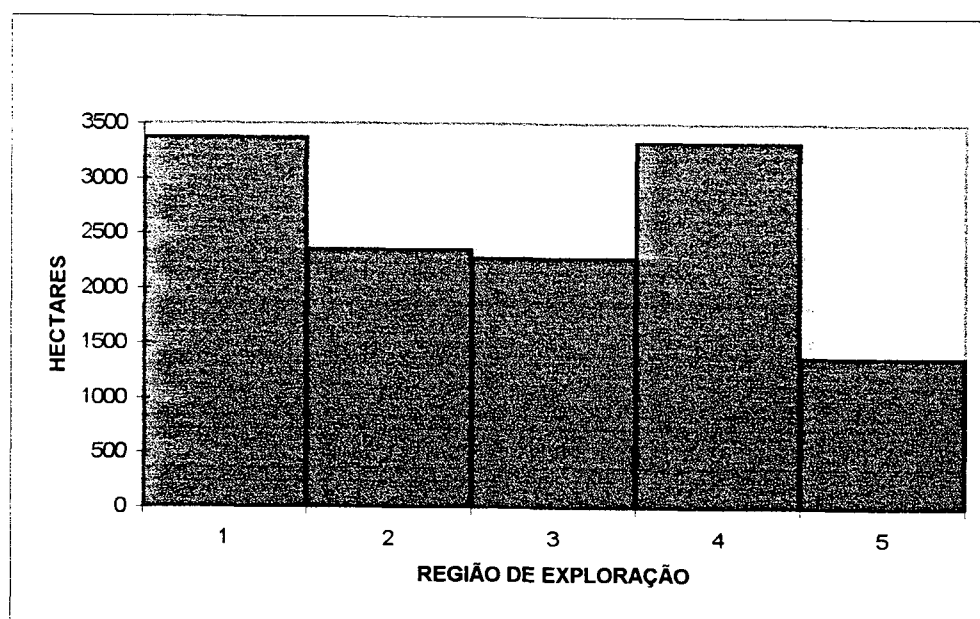


FIGURA 12: DISTRIBUIÇÃO DOS ESTRATOS POR REGIÃO DE COLHEITA





Esta situação não chega a ser ideal em termos de distribuição, mas é representativa da empresa considerada, como também de tantas outras do mesmo setor.

O total da área escolhida corresponde a aproximadamente 18% do total da área explorada pela empresa. Esta mesma proporção foi utilizada para se definir as demandas de processo ao longo de todo período de planejamento.

Os dados necessários para execução do modelo são discutidos nas seções seguintes, de 3.4.1 até 3.4.8 .

#### 3.4.1 Área

As áreas disponíveis dos 80 estratos estão no arquivo de áreas AREA2.FOR, na mesma ordem em que eles são considerados nos demais arquivos do programa RESOLVE. Este arquivo se encontra no Anexo 1.

#### 3.4.2 Demanda

Como a empresa em questão produz papel, sua demanda preferencial é de madeira para suprir as necessidades da fábrica.

Nas restrições de demandas foram consideradas apenas as demandas obrigatórias de madeira para o processo, sendo que os produtos de serraria e laminados restantes são vendidos para o mercado.

Foi considerado no modelo, 18% da demanda total de madeira para processo da empresa, mantendo-se este valor constante ao longo dos 30 anos de planejamento. Esta proporção de 18% corresponde à mesma relação de área que foi considerada em relação ao total de propriedade da empresa. Portanto, o arquivo de demandas é da forma

$[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 75000 \ 0]^T$ , para qualquer período  $k$ , pois assume-se que a demanda total de madeira para processo seja de  $\cong 420.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

Não foi considerada a demanda de energia pois ela não é obtida através do *Pinus taeda*.

### 3.4.3 Preços

No modelo básico, considerou-se que os preços de cada produto não variam ao longo dos  $PP$  anos de planejamento.

Numa pesquisa de mercado, encontraram-se preços que variavam entre os limites citados na Tabela 07. Os valores são para os produtos colocados, prontos para carregamento na floresta, com casca, no ano de 1996.

TABELA 07: PREÇOS DOS PRODUTOS

PRODUTO	NÃO - PODADO (US\$/m <sup>3</sup> )	PODADO (US\$/m <sup>3</sup> )
Laminado	15 - 85	30 - 110
Serraria	8 - 15	8 - 15
Processo	6 - 9	
Energia	3 - 6	

No arquivo de preços considerado no modelo usaram-se os valores apresentados na Tabela 08, sendo escritos na ordem em que os produtos foram apresentados na seção 3.1.2.3, de  $l=1$  até  $l=10$ , período após período. No arquivo estão representados os valores reais dos preços, no período em que ele é vendido; depois é calculado o valor presente para ser utilizado no cálculo da Função Objetivo.

TABELA 08 : PREÇOS DOS PRODUTOS UTILIZADOS NO MODELO

PRODUTO	NÃO - PODADO (US\$/m <sup>3</sup> )	PODADO (US\$/m <sup>3</sup> )
Laminado1	18,00	36,00
Laminado2	44,00	88,00
Laminado3	84,00	110,00
Serraria	9,00	9,00
Processo	6,00	
Energia	6,00	

#### 3.4.4 Volume máximo de compra de madeira para processo

Segundo levantamentos feitos pela própria empresa, existem atualmente em oferta cerca de 2.000.000 m<sup>3</sup> de madeira para processo nas proximidades da fábrica. Desta oferta, cerca de 1.000.000 m<sup>3</sup> a empresa está disposta a comprar nos próximos 5 anos, o que equivale à cerca de 200.000 m<sup>3</sup> / ano.

No arquivo de *VMCP* foi considerado o volume máximo de compra de 75.000 m<sup>3</sup> em todos os períodos de planejamento, já que este é o máximo do valor da demanda de processo considerado no modelo. Nos 5 primeiros anos esta oferta realmente existe no mercado e nos anos restantes, se o modelo fizer uso desta compra, seu valor representa o quanto faltará posteriormente e que a empresa terá que suprir de alguma forma, seja através da ampliação de novos mercados de compra deste produto ou através de novos plantios em outras regiões.

#### 3.4.5 Controle de volume de corte nos P primeiros anos de planejamento

Este conjunto de restrições é utilizado quando existe restrição técnica em termos de capacidade de produção da fábrica de utilizar a produção explorada. A empresa pode atender

um volume de no máximo  $1.500.000 m^3$  por ano. Estas restrições também controlam o total explorado quando as empresas possuem muitas áreas velhas disponíveis para corte, como também controla o total disponível no mercado, de forma a não deixar cair o preço. Este conjunto de restrições também ajuda a limitar a quantidade explorada no início do planejamento pois como o modelo maximiza o valor líquido presente da receita, o que significa que as receitas dos primeiros anos de planejamento tem peso maior do que receitas dos últimos anos e o próprio modelo procura, após atender as demandas, cortar o máximo possível no início do planejamento. O arquivo VX2.FOR apresenta  $1.500.000 m^3$  como limite máximo para corte para cada um dos 5 primeiros anos de planejamento.

### 3.4.6 Custos de manejo

#### 3.4.6.1 Atividades e regimes de manejo

Para executar o modelo da seção 3.1.4 se faz necessário conhecer cada custo  $c_{ij}$  das atividades do manejo  $j$ , do estrato  $i$ , quando implementado em uma unidade de área de 1 hectare. Os custos  $c_{ij}$ /unidade de área dependem das atividades que são consideradas no regime  $j$ .

Foram considerados 3 tipos distintos de regimes de manejo: regimes *clearwood*, para serem utilizados em estratos podados; regimes *utility*, cujo objetivo é manejar para obter produtos de serraria e laminados, além de madeira para processo; e regimes *pulpwood* cuja principal meta é obter madeira para atender o processo de fabricação de papel.

Na Tabela 09 estão representados os 11 regimes de manejo, conforme suas idades de poda, quando houver, seus desbastes intermediários e corte final *CR*.

TABELA 09: IDADES DE CORTE E DESBASTES DOS REGIMES DE MANEJO CONSIDERADOS NO MODELO

REGIME	PODA1	PODA2	DESBASTE1	DESBASTE2	CORTE FINAL
R1	x	x	x	x	13
R2	x	x	x	x	14
R3	x	x	x	x	15
R4	x	x	10	14	20
R5	x	x	8	12	20
R6	x	x	8	12	25
R7	x	x	9	13	20
R8	3	7	3	10	20
R9	4	8	4	11	20
R10	5	9	5	12	20
R11	4	8	4	11	25

Os regimes R1, R2 e R3 são regimes *pulpwood*; os regimes R4, R5, R6, R7 regimes *utility* e os regimes R8, R9, R10 e R11, regimes *clearwood*. Os regimes R2, R5 e R9 são os que a empresa costuma utilizar no seu plano de manejo; os demais são variações destes.

Além desses 11 regimes foi considerado mais um, disponível a todos os estratos, chamado de regime 'abandono'. Este regime se escolhido, significa que a área será deixada como estava no início do planejamento e considerada desnecessária para a empresa, no sentido que todas as demandas obrigatórias são atendidas sem precisar explorar a área considerada e que se manejada trará prejuízo.

A cada manejo estão associados vários custos. O cálculo dos custos foi feito em função dos custos operacionais, não tendo sido considerados os custos fixos. Os custos operacionais são custos que se referem aos dispêndios diretos na produção. Nas atividades terceirizadas os custos são aqueles pagos aos empreiteiros.

Nas Tabelas 10 e 11 estão representados os custos de cada etapa utilizada no manejo, por região e as idades do estrato em que incidem estas atividades. Na Tabela 10 estão representados os custos que são calculados por hectare.ano e na Tabela 11, os custos que são calculados por m<sup>3</sup> no ano da exploração.

TABELA 10: CUSTOS DE MANEJO EM US\$ / ha . ano

ETAPA	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5	Idade em que incide o custo
Implantação	258,85	321,65	258,85	381,05	263,65	1
Manutenção	0,00	66,18	0,00	66,18	66,18	1
	86,42	86,42	86,42	152,77	152,77	2
	86,42	86,42	86,42	152,77	152,77	3
	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	4
	52,40	52,40	55,40	64,40	61,40	> 4
Podar 1	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	t=3 , 4 ou 5
Podar 2	45,01	45,01	45,01	45,01	45,01	t+4

TABELA 11: CUSTOS DE COLHEITA E TRANSPORTE EM US\$/ m<sup>3</sup> NO ANO DE CORTE

ETAPA	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5	Idade em que incide
Colheita C	6,39	6,39	6,39	6,39	6,39	ano corte
Transporte T	6,09	6,09	3,36	12,81	8,66	ano corte
C+T	12,70	12,70	9,97	19,42	15,27	ano corte
Custo indireto	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	ano corte

A região 4, por se localizar mais longe da empresa, possui custos maiores. As regiões 1 e 3 estão situadas em torno da empresa.

As atividades consideradas em cada etapa foram:

### Na etapa de implantação:

- Derrubada da vegetação nativa, se necessário, com custos de mão-de-obra e equipamentos, em US\$/ha.
- Preparo do terreno, com custos de mão de obra, aragem, coveamento, em US\$/ha.
- Preparo de mudas, com custos de mão de obra, sementes, irrigação, adubação e controle de pragas, em US\$/ha.
- Plantio, com custos de mão de obra, equipamentos, adubação, defensivos para controle de ervas daninhas e formigas, em US\$/ha.
- Replântio, com custos de mão-de-obra e novas mudas usadas para replântio, a partir dos 6 meses até 1 ano de idade, em US\$/ha.

Para o estudo de caso, o custo de implantação variou de US\$258,83/ha/ano a US\$381,05/ha/ano, gasto durante o primeiro ano de idade. Os valores por região constam da Tabela 12.

TABELA 12: CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM US\$/ha

ATIVIDADES	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Desmatamento	0,00	0,00	0,00	59,40	0,00
Preparo do solo	84,60	147,40	84,60	1 47,40	89,40
Combate a formigas	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48
Mudas	104,73	104,73	104,73	104,73	104,73
Plantio	21,33	21,33	21,33	21,33	21,33
Replântio	7,71	7,71	7,71	7,71	7,71
Subtotal	258,85	321,65	258,85	381,05	263,65

### Na etapa de manutenção:

- A manutenção ocorre durante todos os períodos de planejamento e envolve a conservação de toda infra-estrutura de estradas, roçadas, controle de incêndio, pragas e ervas daninhas. Pode ser feita de forma manual, mecanizada ou ambas.
- Os gastos com manutenção são diferentes nos 4 primeiros anos e por região; depois eles se mantêm constante. Inclui gastos com administração, que ocorrem em todas as atividades.
- Custos de administração nos primeiros 4 períodos foram incluídos nas outras atividades.
- Uma forma para se obter este custo é considerar o gasto total  $G$  ocorrido com pessoal em US\$ no período  $k$ , o total de hectares  $T$  usados no planejamento e daí a razão  $G/T$  representa o custo administrativo por ha no período  $k$ , em US\$/ha.
- Outra maneira é avaliar o gasto médio / pessoa / período que será chamado de  $g(k)$ , o número de pessoas  $N$  usadas para administrar  $T$  hectares. Como  $N/T$  representa o número pessoas necessárias para administrar 1 hectare, o produto  $g(k) \cdot N/T$  representa o custo em US\$/ha/período. O valor líquido presente nos  $PP$  anos é dado por  $\sum_{k=1}^{PP} \frac{g(k) \cdot N / T}{(1 + juro)^k}$  em

US\$/ha.

Nas Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17 constam os valores dos custos de manutenção utilizados no estudo de caso.

TABELA 13: CUSTOS DE MANUTENÇÃO<sup>01</sup> EM US\$/ha

Manutenção 1º ano	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Limpeza	0,00	66,18	0,00	66,18	66,18
Combate a formigas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Subtotal	0,00	66,18	0,00	66,18	66,18



TABELA 14: CUSTOS DE MANUTENÇÃO2 EM US\$/ha

Manutenção 2º ano	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Limpeza	66,18	66,18	66,18	132,53	132,53
Combate a formigas	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24
Subtotal	86,42	86,42	86,42	152,77	152,77

TABELA15: CUSTOS DE MANUTENÇÃO3 EM US\$/ha

Manutenção 3º ano	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Limpeza	66,18	66,18	66,18	132,53	132,53
Combate a formigas	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24
Subtotal	86,42	86,42	86,42	152,77	152,77

TABELA 16: CUSTOS DE MANUTENÇÃO4 EM US\$/ha

Manutenção 4º ano	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Limpeza	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Combate a formigas	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12
Subtotal	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12

TABELA 17: CUSTOS DE MANUTENÇÃO APÓS ANO4 EM US\$/ha

Manutenção 5º ano ao 20º ano	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
Proteção	33,00	33,00	36,00	45,00	42,00
Administração	19,40	19,40	19,40	19,40	19,40
Subtotal	52,40	52,40	55,40	64,40	61,40

**Na etapa de poda:**

- A poda é executada duas vezes durante a rotação, quando se pretende ter madeira sem nós, de melhor qualidade.

- A primeira poda é feita junto com o primeiro desbaste, até uma altura de aproximadamente 2 metros e só é executada nas árvores que futuramente serão utilizadas como produto podado, com um custo médio de US\$34,00 / ha.
- A segunda poda é feita apenas nas melhores 500 árvores, com um custo de US\$45,01 / ha. a uma altura entre 6 e 7 metros, exigindo equipamentos mais caros.
- As idades das podas variam de sítio para sítio. Se o sítio for muito produtivo, a primeira poda pode ocorrer entre 2 a 4 anos, se for pouco produtivo, de 5 a 12 anos. A segunda poda, quando efetuada em sítios melhores ocorre aos 7 ou 8 anos. Os anos de poda foram representados por  $t$  e  $t+4$ .

#### **Na etapa de colheita e transporte:**

- O custo de colheita e transporte é calculado em US\$/m<sup>3</sup>.
- Às vezes, é necessária a abertura de estradas para a colheita.
- A exploração é separada em duas fases: a da colheita e a do transporte.
- A topografia foi considerada de três tipos : plana, ondulada ou acidentada.
- O custo de colheita depende da mecanização utilizada; a derrubada pode ser feita por feller, o desgalhamento e traçamento pode ser feito por qualquer um dos três conjuntos: feller e skidder, harvester e forwarder ou moto-serra e mini-skidder.
- Nesta etapa ainda consideram-se as atividades de arraste ou baldeio; de carregamento e do transporte; do descarregamento, recebimento e conferência.
- Inclui-se também nesta etapa a atividade de marcar árvores a serem desbastadas.
- O custo de transporte depende da região ao qual o estrato pertença.

- Em geral, no primeiro desbaste o custo independe da produção, que é baixa, mas que envolve operações necessárias para os demais desbastes.
- Foi considerado custo de colheita e transporte por região . É necessário conhecer a produção total desbastada em cada ano que houver corte, em m<sup>3</sup>/ha, e multiplicar pelos valores dos custos em US\$ / m<sup>3</sup>, conforme o caso, para se obter o custo em US\$ / ha.ano .
- Os dados de produção, intermediários e final, foram obtidos pelo simulador de produção SISPINUS, desenvolvido por pesquisadores da EMBRAPA, OLIVEIRA et al. (1989). Os dados foram representados nas tabelas TsdrP.FOR e TsdrN.FOR para cada classe de sítio  $s$ , densidade de plantio  $d$ , região  $r$  e para produtos podados  $P$  e não-podados  $N$ . A obtenção destas tabelas será discutida na seção 3.4.8 .

#### **O custo indireto:**

- O custo indireto refere-se aos custos com pessoal, expedição e vendas, isto é, todos custos envolvidos indiretamente com a produção e comercialização da madeira e ocorre toda vez que há produção através de um desbaste ou corte raso. Também é calculado em US\$/m<sup>3</sup>.

Seja  $c_{ij}$  o custo presente do manejo em US\$/ha do estrato  $i$ , segundo o manejo  $j$ ;  $c_{ij}^k$  o custo de manejo em US\$/ha do estrato  $i$ , manejo  $j$ , durante o período  $k$ ;  $c_{ij}^{ks}$  o custo de manejo em US\$/ha da atividade  $s$  envolvida no manejo  $j$ , do estrato  $i$ , durante o período  $k$ ; então

$$c_{ij}^k = \sum_{s=1}^{NA_k} c_{ij}^{ks} \quad \text{e} \quad c_{ij} = \sum_{k=1}^{PP} \frac{c_{ij}^k}{(1 + juro)^k}, \quad \text{onde } NA_k \text{ representa o número de atividades}$$

envolvidas no manejo  $j$  do estrato  $i$ , durante o período  $k$ .

O custo  $c_{ij}^k$  é obtido pela soma de todos os custos das atividades  $s$  envolvidas no manejo  $j$ , do estrato  $i$ , no período  $k$ . Como a função objetivo usa o critério do valor líquido presente, o valor presente dos custos por atividade e período são calculados.

Foi desenvolvido um programa em FORTRAN, CARQ.FOR, para calcular os custos de manejo, relativos a qualquer um dos 11 primeiros regimes de manejo considerados.

As informações de cada estrato são encontradas nos arquivos ESTRATO2.FOR e ESC20.FOR. No primeiro arquivo, as informações estão representadas conforme a Tabela 18.

TABELA 18: INFORMAÇÕES DOS ESTRATOS NO ARQUIVO ESTRATO2.FOR

Idade	Característica	IS	Dens. plantio	Espécie	Região	Ipoda
0-24	$P:=1$	1-4	1:=1666	1:= <i>P. taeda</i>	1-5	idade da
	$N:=0$		2:=2000	2:= <i>P. elliottii</i>		1ª poda

A idade do estrato refere-se ao período  $k=0$  de planejamento. Qualquer intervenção feita neste estrato será a partir do período  $k=1$ , primeiro ano de planejamento, quando o estrato terá um ano a mais de idade.

O código para a característica do estrato é de código 1 para estrato podado e 0 para o não podado.

Foram consideradas duas densidades de plantio, sendo usado código 1 para densidade inicial de 1666 árvores por hectare e código 2 para densidade de 2000 árvores por hectare.

O programa está preparado para trabalhar com duas espécies de *Pinus*: *Pinus taeda* representado pelo código 1 e *Pinus elliottii*, pelo código 2.

A zona à qual o estrato pertence é dada por uma das 5 regiões.

Se o estrato é do tipo podado e já sofreu alguma poda, é informado com que idade ocorreu a 1ª poda; caso contrário digita-se idade 0.

No Anexo 2 está representado o arquivo ESTRATO2.FOR para o estudo de caso considerado.

No arquivo ESC20.FOR tem-se as informações de quais regimes atuam em cada estrato, da forma:

idade do estrato $i$	escolha( $i,1$ )	escolha( $i,2$ )	.....	escolha( $i,NR$ )
----------------------	------------------	------------------	-------	-------------------

onde  $escolha(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{se regime } j \text{ atua no estrato } i \\ 0 & \text{em outros casos} \end{cases}$

para  $i=1, \dots, NE$  e  $j=1, \dots, NR$ . O arquivo ESC20.FOR, para o estudo de caso, está no Anexo 3.

No arquivo de saída do programa de cálculo do custo, têm-se os valores de  $c_{ij}$  para  $i=1, \dots, NE$  e  $j=1, \dots, 11$ , onde  $i$  representa o estrato e  $j$  o manejo. O  $c_{ij}$  representa o valor presente do custo do manejo em US\$/ha para todo o período de planejamento. Os custos das várias etapas são dados de entrada do programa os quais podem ser alterados, quando necessários.

No regime 'abandono' apesar da área não ser manejada, existe custo. O cálculo deste custo é feito através da fórmula  $c_{i,12} = \sum_{k=1}^{PP} \frac{c_{i,12}^{k,s}}{(1 + juro)^k}$ , onde  $c_{ij}^{ks}$  é o custo da atividade  $s$  de administração do estrato  $i$ , segundo o regime 12, 'abandono de área'.

### 3.4.6.2 Detalhamento dos cálculos de custos

Estes cálculos foram executados no programa CARQ.FOR. Apesar de ser de conhecimento corrente, será exemplificado para a região 1, em um estrato podado.

Nas tabelas desta seção será utilizada a seguinte nomenclatura:

$k=0$  representa o início do planejamento;

*Idade* representa a idade do estrato em  $k=0$ ;

$H = 30$  anos;

$CF$  = idade do corte raso;

$desb1$  = idade do 1º desbaste;

$desb2$  = idade do 2º desbaste.

### Custos de implantação:

A implantação ocorre na idade 1. Caso seja executado um corte raso durante o período de planejamento, um novo custo de implantação ocorrerá 2 anos após o corte raso, isto é, dá-se um ano de prazo entre  $CF$  e um novo estabelecimento do mesmo estrato. Ocorre no mínimo uma e no máximo duas implantações durante os 30 anos de planejamento. O cálculo é feito segundo a Tabela 19, onde vários testes são feitos:

(1º) Se o estrato tiver  $Idade=0$  no período 0 de planejamento, é calculado o  $VLP$  do custo de implantação no período 1 de planejamento, obtendo-se  $VLP(IMP1)$ .

(2º) Se  $Idade > 0$  no período 0 de planejamento, verifica-se a possibilidade de novas implantações no horizonte de planejamento através dos testes  $CF - Idade + 2 \leq H$  e  $CF - Idade + 2 + (CF - 1) + 2 \leq H$ . Os valores líquidos presentes em cada caso são calculados obtendo-se  $VLP(IMP2)$  e  $VLP(IMP3)$ , respectivamente.

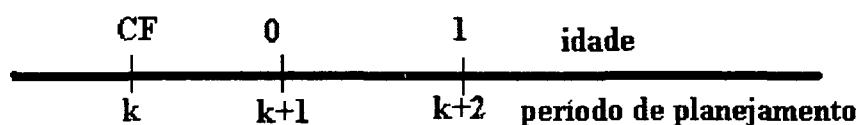


TABELA 19: CÁLCULOS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM US\$/ha

Se	Valor da implantação na idade 1	Valor líquido presente da implantação
$Idade = 0$	$IMP1 = 258,85$	$VLP(IMP1) = \frac{258,85}{(1 + juro)^1} = 244,20$
$CF - Idade + 2 \leq H$	$IMP2 = 258,85$	$VLP(IMP2) = \frac{258,85}{(1 + juro)^{CF - Idade + 2}}$
$CF - Idade + 2 + (CF - 1) + 2 \leq H$	$IMP3 = 258,85$	$VLP(IMP3) = \frac{258,85}{(1 + juro)^{2 \cdot CF - Idade + 3}}$

O valor líquido presente das implantações nos 30 anos é calculado por:

$$IMP = VLP(IMP1) + VLP(IMP2) + VLP(IMP3).$$

#### Custo de manutenção:

O custo de manutenção se distribui ao longo de todos os períodos de planejamento e depende do ano e região em que ele é realizado. Por exemplo, para a região 1, tem-se:

Idade do estrato	1	2	3	4	> 4
Custo US\$ /ha /ano	0	86,42	86,42	10,12	52,40

Para calcular o custo de manutenção são feitos vários testes, análogos aos feitos na Tabela 19, em relação à idade do estrato, para ver se existe ou não o custo relativo àquele período de planejamento.

O valor líquido presente das manutenções na idade 1 nos 30 anos é calculado por:  
 $MANUT(Idade1) = VLP(MANU11) + VLP(MANU12) + VLP(MANU13)$ , conforme Tabela 20.

O valor líquido presente das manutenções na idade 2 nos 30 anos é calculado por:  
 $MANUT(Idade2) = VLP(MANU21) + VLP(MANU22) + VLP(MANU23)$ , conforme Tabela 21.

O valor líquido presente das manutenções na idade 3 nos 30 anos é calculado por:

$$\text{MANUT}(\text{Idade}3) = \text{VLP}(\text{MANU}31) + \text{VLP}(\text{MANU}32) + \text{VLP}(\text{MANU}33); \text{ ver Tabela 22.}$$

TABELA 20: CÁLCULOS DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO NA IDADE 1 EM US\$/ha

Se	Valor da manutenção na idade 1	Valor líquido presente da manutenção idade 1
$\text{Idade} = 0$	$\text{MANU}1=0,00$	$\text{VLP}(\text{MANU}11) = \frac{0,00}{(1 + \text{juro})^1}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 2 \leq H$	$\text{MANU}1=0,00$	$\text{VLP}(\text{MANU}12) = \frac{0,00}{(1 + \text{juro})^{\text{CF}-\text{Idade}+2}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 2 + (\text{CF}-1) + 2 \leq H$	$\text{MANU}1=0,00$	$\text{VLP}(\text{MANU}13) = \frac{0,00}{(1 + \text{juro})^{2\text{CF}-\text{Idade}+3}}$

TABELA 21: CÁLCULOS DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO NA IDADE 2 EM US\$/ha

Se	Valor da manutenção na idade 2	Valor líquido presente da manutenção idade 2
$\text{Idade} < 2$	$\text{MANU}2=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}21) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{2-\text{Idade}}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 3 \leq H$	$\text{MANU}2=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}22) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{\text{CF}-\text{Idade}+3}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 3 + (\text{CF}-2) + 3 \leq H$	$\text{MANU}2=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}23) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{2\text{CF}-\text{Idade}+4}}$

TABELA 22: CÁLCULOS DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO NA IDADE 3 EM US\$/ha

Se	Valor da manutenção na idade 3	Valor líquido presente da manutenção idade 3
$\text{Idade} < 3$	$\text{MANU}3=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}31) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{3-\text{Idade}}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 4 \leq H$	$\text{MANU}3=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}32) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{\text{CF}-\text{Idade}+4}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 4 + (\text{CF}-3) + 4 \leq H$	$\text{MANU}3=86,42$	$\text{VLP}(\text{MANU}33) = \frac{86,42}{(1 + \text{juro})^{2\text{CF}-\text{Idade}+5}}$



O valor líquido presente das manutenções na idade 4, nos 30 anos é calculado por:

$$\text{MANUT}(\text{Idade}4) = \text{VLP}(\text{MANU}41) + \text{VLP}(\text{MANU}42) + \text{VLP}(\text{MANU}43); \text{ ver Tabela 23.}$$

TABELA 23: CÁLCULOS DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO NA IDADE 4 EM US\$/ha

Se	Valor da manutenção na idade 4	Valor líquido presente da manutenção idade 4
$\text{Idade} < 4$	$\text{MANU}4=10,12$	$\text{VLP}(\text{MANU}41) = \frac{10,12}{(1 + \text{juro})^{4-\text{Idade}}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 5 \leq H$	$\text{MANU}4=10,12$	$\text{VLP}(\text{MANU}42) = \frac{10,12}{(1 + \text{juro})^{\text{CF}-\text{Idade}+5}}$
$\text{CF}-\text{Idade}+5+(\text{CF}-4)+5 \leq H$	$\text{MANU}4=10,12$	$\text{VLP}(\text{MANU}43) = \frac{10,12}{(1 + \text{juro})^{2\text{CF}-\text{Idade}+6}}$

Manutenção a partir da idade 5 até o corte raso CF:

Fazendo  $t$  variar de 0 até  $\text{CF}-5$ , se  $\text{Idade} \leq 4$  e  $t$  variar de 0 até  $\text{CF} - (\text{Idade}+1)$  se  $\text{Idade} > 4$  e sabendo-se que o valor desta manutenção é de  $\text{MANU}=52,4$  calculam-se seus valores para todo o horizonte de planejamento, segundo a Tabela 24. Tem-se:

$$\text{MANUT}(\text{após Idade 4}) = \Sigma[\text{VLP}(\text{MANU}1)+\text{VLP}(\text{MANU}2)+\text{VLP}(\text{MANU}3)]+\Sigma\text{VLP}(\text{MANU}11)$$

TABELA 24: CÁLCULOS DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO APÓS IDADE 4 EM US\$/ha

Se	Idade da manutenção	Valor líquido presente da manutenção após idade 4
$\text{Idade} \leq 4$	$t+5$	$\text{VLP}(\text{MANU}1) = \frac{52,40}{(1 + \text{juro})^{5-\text{Idade}+t}}$
$\text{Idade} > 4$	$\text{Idade}+1+t$	$\text{VLP}(\text{MANU}11) = \frac{52,40}{(1 + \text{juro})^{t+1}}$
$\text{CF} - \text{Idade} + 6+t \leq H$	$t+5$	$\text{VLP}(\text{MANU}2) = \frac{52,40}{(1 + \text{juro})^{\text{CF}-\text{Idade}+6+t}}$
$\text{CF}-\text{Idade}+\text{CF}+1+6+t \leq H$	$t+5$	$\text{VLP}(\text{MANU}3) = \frac{52,40}{(1 + \text{juro})^{2\text{CF}-\text{Idade}+7+t}}$

Custos de manutenção total:

O valor líquido presente do custo de manutenção ao longo dos 30 anos é calculado adicionando os valores parciais de custos :

$$\text{MANUT}(\text{total}) = \text{MANUT}(\text{Idade1}) + \text{MANUT}(\text{Idade2}) + \text{MANUT}(\text{Idade3}) + \text{MANUT}(\text{Idade4}) + \text{MANUT}(\text{após Idade 4}).$$

### Custo de poda:

A poda foi efetuada nas idades  $t$  e  $t+4$  anos e pode ocorrer até 4 vezes durante o período de planejamento. Junto com a 1ª poda é feito o 1º desbaste não comercial. Então, se o estrato é podado, os custos serão obtidos como na Tabela 25.

TABELA 25: CÁLCULOS DE CUSTOS DE PODA E DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM US\$/ha

Se	Poda1	Desbaste	Poda2	Valor líquido presente da poda
$(t - \text{Idade}) > 0$	34,00	27,56		$VLP(POD1) = \frac{34,00 + 27,56}{(1 + \text{juro})^{t - \text{Idade}}}$
$(t + 4 - \text{Idade}) > 0$			45,01	$VLP(POD2) = \frac{45,01}{(1 + \text{juro})^{t + 4 - \text{Idade}}}$
$CF - \text{Idade} + 1 + t \leq H$	34,00	27,56		$VLP(POD3) = \frac{34,00 + 27,56}{(1 + \text{juro})^{CF - \text{Idade} + 1 + t}}$
$CF - \text{Idade} + 1 + t + 4 \leq H$			45,01	$VLP(POD4) = \frac{45,01}{(1 + \text{juro})^{CF - \text{Idade} + 1 + t + 4}}$
$2.CF - \text{Idade} + 2 + t \leq H$	34,00	27,56		$VLP(POD5) = \frac{34,00 + 27,56}{(1 + \text{juro})^{2.CF - \text{Idade} + 2 + t}}$
$2.CF - \text{Idade} + 2 + t + 4 \leq H$			45,01	$VLP(POD6) = \frac{45,01}{(1 + \text{juro})^{2.CF - \text{Idade} + 2 + t + 4}}$

Portanto o valor líquido presente das podas nos  $PP$  períodos de planejamento será de:

$$\text{PODAT} = VLP(POD1) + VLP(POD2) + VLP(POD3) + VLP(POD4) + VLP(POD5) + VLP(POD6).$$

### Custos de colheita e transporte:

Como os custos de colheita e transporte dependem da produção e a produção depende do regime escolhido e das características do estrato escolhido, os cálculos serão feitos separadamente dependendo da situação.

Tendo-se o custo/m<sup>3</sup>/desbaste, efetua-se o cálculo do custo/ha/desbaste levando em conta que o custo foi diferenciado por região, analisando as diferentes distâncias, declividades e o produto explorado.

Na Tabela 26 estão os preços usados para colheita da madeira, colocada sobre o caminhão, considerando uma declividade média.

Os valores usados para o custo de frete de madeira estão representados na Tabela 27.

TABELA 26: CUSTOS DE COLHEITA POR PRODUTO EM US\$/m<sup>3</sup>

Produtos(stcc)	Processo	Serraria	Laminação	Laminação L3	Valor médio
(US\$/stcc)	4,40	4,60	4,70	4,80	4,63
(US\$/m <sup>3</sup> )	6,29	6,57	6,71	6,86	6,61

stcc: metro estéreo com casca

TABELA 27: CUSTOS DE TRANSPORTE POR CLASSE DE DISTÂNCIA

Classe de distância (km)	Processo US\$/stcc	Serraria US\$/stcc	Valor médio US\$/stcc	Valor médio US\$/m <sup>3</sup>
21-25	2,26	2,44	2,35	3,36
56-60	4,11	4,42	4,27	6,10
86-90	5,84	6,29	6,07	8,67
126-130	8,63	9,30	8,97	12,81

stcc: metro estéreo com casca

Só foram consideradas na Tabela 27 as classes de distância associadas às 5 regiões do estudo de caso. Na Tabela 28 está representada a distância média de cada região até o centro de operações.

TABELA 28 : DISTÂNCIAS MÉDIAS: REGIÃO x CENTRO DE OPERAÇÕES

Região	1	2	3	4	5
Distância (km)	60	60	25	130	90

Na Tabela 29 estão os cálculos dos custos de colheita e transporte por região.

TABELA 29: CUSTOS MÉDIOS DE COLHEITA E TRANSPORTE EM US\$/m<sup>3</sup>

Região	1	2	3	4	5
Valor médio (US\$/m <sup>3</sup> )	6,61+6,10 =12,71	6,61+6,10 =12,71	6,61+3,36 =9,97	6,61+12,81 =19,42	6,61+8,67 =15,28

Portanto, se os regimes forem o R1, R2 ou R3, com a idade do estrato e as respectivas idades dos desbastes que estão nos arquivos tipo ESCOLHA e ESTRATO, e das tabelas de produção global TAsdrP/N, os cálculos dos custos de colheita e transporte são feitos conforme a Tabela 30. O período1 de corte acontece na idade 13 para R1, 14 para R2 e 15 para R3.

Foi calculado o custo indireto de produção e comercialização da madeira. Gastos com chefia, estradas, expedição, vendas e administração dão um valor de US\$ 2,47/m<sup>3</sup>cc/ano quando ocorre o corte. Este custo foi chamado de *cind2*.

O cálculo do custo de colheita e transporte para estes regimes é obtido pela soma:

$$EXPLOT = VLP(EXPLO1) + VLP(EXPLO2) + VLP(EXPLO3), \text{ valores da Tabela 30.}$$

TABELA 30: CÁLCULO CUSTOS DE COLHEITA E TRANSPORTE PARA OS REGIMES DE MANEJO R1, R2, R3 EM US\$/m<sup>3</sup>

Se	Valor líquido presente da exploração
$0 < \text{período1 de corte} - \text{Idade} \leq H$	$VLP(EXPLO1) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{\text{período1} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período1 de corte} - \text{Idade} + 1 + \text{período1 de corte} \leq H$	$VLP(EXPLO2) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período1} - \text{idade} + 1}}$
$0 < \text{período1 de corte} - \text{Idade} + 1 + \text{período1 de corte} + 1 + \text{período1 de corte} \leq H$	$VLP(EXPLO3) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{3 \cdot \text{período1} - \text{idade} + 2}}$

Se o regime for o R4, R5, R6 ou R7, o cálculo é análogo, porém nestes regimes têm-se dois desbastes e um corte raso, conforme visto na Tabela 31. Nas Tabelas 30, 31 e 32, *custo* e *Prod* representam respectivamente, o vetor de custos e o de produções no ano de corte.

TABELA 31: CÁLCULO DOS CUSTOS DE COLHEITA E TRANSPORTE PARA OS REGIMES R4, R5, R6 E R7 EM US\$/m<sup>3</sup>

Se	Valor líquido presente da exploração
$0 < \text{período1 de corte} - \text{idade} \leq H$	$VLP(EXPLO1) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{\text{período1} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período2 de corte} - \text{idade} \leq H$	$VLP(EXPLO2) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{\text{período2} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período3 de corte} - \text{idade} \leq H$	$VLP(EXPLO3) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{\text{período3} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período1 de corte} - \text{idade} + 1 + \text{período1 corte} \leq H$	$VLP(EXPLO4) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período1} - \text{idade} + 1}}$
$0 < \text{período2 de corte} - \text{idade} + 1 + \text{período2 corte} \leq H$	$VLP(EXPLO5) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período2} - \text{idade} + 1}}$
$0 < \text{período3 de corte} - \text{idade} + 1 + \text{período3 corte} \leq H$	$VLP(EXPLO6) = \frac{(\text{custo} + \text{cind}2) \cdot \text{Pr od}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período3} - \text{idade} + 1}}$

Os valores dos períodos de corte variam conforme o regime considerado.

O cálculo do custo da colheita e transporte para os regimes R4 até R7 é calculado por:

$$\text{EXPLOT} = \text{VLP}(\text{EXPLO1}) + \text{VLP}(\text{EXPLO2}) + \text{VLP}(\text{EXPLO3}) + \text{VLP}(\text{EXPLO4}) + \text{VLP}(\text{EXPLO5}) + \text{VLP}(\text{EXPLO6}), \text{ valores da Tabela 31.}$$

Para os regimes R8, R9, R10 ou R11, inclui-se o cálculo da poda e tem-se um desbaste e um corte raso, conforme apresentado na Tabela 32, onde *Prod* representa o vetor de produções no ano de colheita. O cálculo da colheita e transporte para estes regimes é feito por:  $\text{EXPLOT} = \text{VLP}(\text{EXPLO1}) + \text{VLP}(\text{EXPLO2}) + \text{VLP}(\text{EXPLO3}) + \text{VLP}(\text{EXPLO4})$ , valores da Tabela 32.

TABELA 32: CÁLCULO DOS CUSTOS DE COLHEITA E TRANSPORTE PARA OS REGIMES DE MANEJO R8, R9, R10 E R11 EM US\$/m<sup>3</sup>

Se	Valor líquido presente da exploração
$0 < \text{período1 de corte} - \text{idade} \leq H$	$\text{VLP}(\text{EXPLO1}) = \frac{(\text{custo} + \text{cind2}) \cdot \text{Prod}}{(1 + \text{juro})^{\text{período1} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período2 de corte} - \text{idade} \leq H$	$\text{VLP}(\text{EXPLO2}) = \frac{(\text{custo} + \text{cind2}) \cdot \text{Prod}}{(1 + \text{juro})^{\text{período2} - \text{idade}}}$
$0 < \text{período1 de corte} - \text{idade} + 1 + \text{período1 de corte} \leq H$	$\text{VLP}(\text{EXPLO3}) = \frac{(\text{custo} + \text{cind2}) \cdot \text{Prod}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período1} - \text{idade} + 1}}$
$0 < \text{período2 de corte} - \text{idade} + 1 + \text{período2 de corte} \leq H$	$\text{VLP}(\text{EXPLO4}) = \frac{(\text{custo} + \text{cind2}) \cdot \text{Prod}}{(1 + \text{juro})^{2 \cdot \text{período2} - \text{idade} + 1}}$

O programa CARQ.FOR utilizou todos os desenvolvimentos estabelecidos nesta seção. Ele é bastante flexível em relação ao número de estratos e regimes considerados.

O programa de custos foi executado para o modelo básico em questão. Os valores dos custos encontrados constam do arquivo CUSTO22.FOR, que está apresentado no Anexo 4.

### 3.4.7 Valor terminal

O valor terminal  $VT_{ij}$  relativo ao estrato  $i$  e manejo  $j$  representa um fluxo de caixa obtido pela aplicação do regime economicamente ótimo (REO) no estrato  $i$ , após o final do período de planejamento, considerando as hipóteses apresentadas por CLUTTER et al.(1983) :

- Se a idade final  $i_F$  do estrato, no final do período de planejamento é maior ou igual a idade do corte raso  $CR$  do REO, o estrato será cortado ao final do período de planejamento.
- Se a idade final  $i_F$  do estrato for menor que do corte raso  $CR$  do REO, então maneja-se o estrato segundo o REO até o  $CR$ , fornecendo um fluxo financeiro, cujo valor presente no final do planejamento será chamado de Valor do Estoque em Pé,  $VEP_{ij}$  em  $PP$ .
- Após o corte do estrato  $i$ , observadas as considerações anteriores, supõe-se que o mesmo será manejado pelo seu REO em perpetuidade, cujo fluxo de caixa, a partir daí, será chamado de Valor Esperado da Terra relativo ao estrato  $i$ , ou seja  $VET_i$ .

LEUSCHNER (1984) afirma que o  $VET$  é um caso especial do critério do valor líquido presente  $VLP$  considerando que:

- O valor da terra é zero.
- Não há estratos residuais.
- A terra será manejada em perpetuidade.
- O fluxo de caixa será o mesmo em perpetuidade.

O  $VET$  expressa o quanto o proprietário florestal pode dispender para aquisição de cada novo hectare de terra, desde que seja implementado o REO nas mesmas condições de cálculo.

Para escolher o REO é necessário:

1. Definir os regimes a serem considerados no planejamento.

2. Especificar o critério de decisão a ser usado no modelo.

O  $VET$  foi calculado pelas características do estrato  $i$ , seu sítio  $s$  e a região  $r$  ao qual pertence. Então para cada regime  $j$ , calcula-se o  $VET_{srij}$  e escolhe-se entre os possíveis regimes oferecidos, o regime REO para o estrato  $i$ , como sendo aquele que dá o melhor retorno, o máximo  $VLP$  para uma rotação infinita, como a seguir:

$$\text{Seja o retorno financeiro para uma rotação, então } VLP ( R - C ) = \sum_{t=0}^{CR} \frac{(R_t - C_t)}{(1 + juro)^t}$$

sendo  $R_t$  a receita ocorrida no período  $t$  e  $C_t$  o custo ocorrido no mesmo período.

Supondo que este manejo seja repetido indefinidamente, o valor da soma infinita  $S$  dos fluxos de caixa é obtido pela soma de uma progressão geométrica cujo primeiro termo  $a_1$  é

$$VLP(R-C) \text{ e a razão } q \text{ é } \frac{1}{(1 + juro)^{CR}}.$$

A soma da progressão é calculada pela fórmula matemática

$$S = \frac{a_1}{1 - q} = \frac{VLP(R - C)}{1 - \frac{1}{(1 + juro)^{CR}}} = VLP(R - C) \cdot \frac{(1 + juro)^{CR}}{(1 + juro)^{CR} - 1} = VET_{srij}. \text{ Escolhendo}$$

$$VET_{sri}^* = \max_j \{ VET_{srij} \} \text{ tem-se o valor esperado da terra.}$$

O  $VET$  associado ao regime abandono, foi calculado pelo fluxo de caixa obtido pelo custo de administração, calculado em perpetuidade. Portanto, usando a mesma fórmula de soma de uma progressão geométrica tem-se:

$$VET_{j=abandono} = - \frac{\text{Custo anual de administração}}{1 - \frac{1}{(1 + juro)}}.$$

Para qualquer estrato  $i$ ,  $VET_i$  é obtido por  $VET_{sri}^*$ , com a informação do sítio  $s$  e da região  $r$  onde o estrato  $i$  está localizado.



O *VEP*, Valor do estoque em pé, foi calculado considerando o valor líquido presente em *PP*, das receitas e custos advindas da complementação do manejo ótimo REO para cada estrato, após o término do planejamento. O valor obtido é chamado de *VEP<sub>ij</sub>*.

Assumindo as hipóteses iniciais de Leuschner, o valor terminal *VT* calculado em *PP* é então obtido por:

$$VT_{ij} = \begin{cases} VEP_{ij} + \frac{VET_i}{(1 + juro)^{CR_{REO} - i_F}}, & \text{se } i_F < CR_{REO} \\ VEP_{ij} + VET_i, & \text{se } i_F \geq CR_{REO}. \end{cases}$$

Foram desenvolvidas duas planilhas para fazer os cálculos do *VET* e do *VEP*.

#### 3.4.7.1 Valor esperado da terra

O *VET* foi calculado pela planilha VETCALC, para um determinado estrato *i*, regime *j*, gerando o arquivo VETsr-reg.XLS, quando é alimentado com as características do estrato e do regime, as quais são:

- idades de desbastes intermediários e corte raso: *desb1*, *desb2* e *CR*;
- classe de sítio: *s*;
- região: *r*;
- produções em m<sup>3</sup>/ha em cada idade de corte, para cada um dos 10 produtos considerados.

Além destas, outras informações também são necessárias, tais como:

- preços/m<sup>3</sup> dos 10 produtos;
- valores dos custos/ha para: implantação *IMP* ocorrida na idade 1; manutenção *MAN1* ocorrida na idade 1, *MAN2* ocorrida na idade 2, *MAN3* ocorrida na idade 3, *MAN4* ocorrida na idade 4, *MAN* ocorrida a partir da idade 5 até o corte raso; poda *PODA1* ocorrida no ano *k* e *PODA2*, no ano *k+4*;

- valores dos custos/m<sup>3</sup> de exploração (colheita e transporte) e custos indiretos  $EXP$  e  $CIND2$ , respectivamente, ocorridos no ano de corte.

Com estas informações a planilha calcula:

1. Valor presente da receita calculado no início da rotação, ao juro de 6% ao ano, através da fórmula:

$$R = \frac{VOL_1 \cdot P}{1,06^{Desb1}} + \frac{VOL_2 \cdot P}{1,06^{Desb2}} + \frac{VOL_{CR} \cdot P}{1,06^{CR}}, \text{ onde } VOL_i \text{ é o vetor das produções dos 10}$$

produtos nas idades de desbastes  $Desb_i$ , para  $i=1,2$  e no corte raso, para  $i=3$ ; e  $P$  é o vetor de preços dos 10 produtos.

2. Valor presente dos custos, calculado no início da rotação, obtido por:

$$C = \frac{IMP}{1,06^1} + \frac{MAN1}{1,06^1} + \frac{MAN2}{1,06^2} + \frac{MAN3}{1,06^3} + \frac{MAN4}{1,06^4} + \sum_{t=5}^{CR} \frac{MAN}{1,06^t} + \frac{VOL_1 \cdot (EXP + CIND2)}{1,06^{Desb1}} +$$

$$+ \frac{VOL_2 \cdot (EXP + CIND2)}{1,06^{Desb2}} + \frac{VOL_{CR} \cdot (EXP + CIND2)}{1,06^{CR}} + \frac{PODA1}{1,06^k} + \frac{PODA2}{1,06^{k+4}}$$

3. O valor líquido presente para uma rotação completa é então calculado por:

$VLP(Rot) = R - C$  e o Valor Esperado da Terra por hectare,  $VET$ , para o sítio  $s$ , região  $r$ , regime  $reg$ , que considera a rotação em perpetuidade é obtido por

$$VET(s, r, reg) = \frac{VLP(Rot) \cdot (1 + juro)^{CR}}{(1 + juro)^{CR} - 1}.$$

O uso da planilha para uma situação particular pode ser observado na Tabela 33, onde foi calculado o  $VET$  para um estrato de sítio  $s = 1$ , região  $r = 1$  e regime  $reg = 6$ , (8-12-25).



Os valores de  $VET(s,r,reg)$  para cada sítio  $s$ , região  $r$  e regime  $reg$  para o estudo de caso estão na Tabela 34. Antecipou-se este resultado para exemplificar os arquivos utilizados no modelo básico.

Com todos os valores calculados, escolhe-se o regime economicamente ótimo como sendo aquele que tem o maior valor do  $VET$ , para cada estrato  $i$ . Na tabela, os maiores  $VET$ 's estão identificados pelo símbolo asterisco (\*).

O  $VET^*(s,r)$  associado a este melhor regime representa o melhor retorno financeiro para o estrato  $i$ , de sítio  $s$  e região  $r$ .

TABELA 34: VALOR ESPERADO DA TERRA PARA O SÍTIO  $s$ , REGIÃO  $r$  E REGIME  $reg - VET(s,r,reg)$

Sítio	Região	VET-R1	VET-R2	VET-R3	VET-R4	VET-R5
1	1					
1	2				-948,56	367,98
1	4				-3710,78	-2021,57
2	1				-1074,90	-162,26
2	2	-4107,18	-3849,46	-3678,28	-1504,50	-228,16
2	4	-7743,43	-7556,16	-7468,00	-3893,32	
2	5	-5626,76	-5346,36	-5167,04	-2134,87	-1242,42
3	1	-3681,17	-3566,37	-3440,34	-1666,12	-977,06
3	2					
3	3	-2645,59	-2506,87	-2369,08	-927,67	-390,79
3	4	-6720,94	-6702,92	-6644,27	-4312,63	-3340,73
3	5	-5114,60	-4995,94	-4859,05	-2874,94	-2100,23
4	1	-3618,99	-3597,49	-3484,04	-2117,15	-1600,76
4	4	-5729,46	-5809,04	-5749,36	-4041,87	-3406,78
4	5	-4558,62	-4542,28	-4418,65	-2972,09	-2446,45

continua...

TABELA 34: VALOR ESPERADO DA TERRA PARA O SÍTIO  $s$ , REGIÃO  $r$  E REGIME  $reg$  -  $VET(s,r,reg)$ .

Sítio	Região	VET-R6	VET-R7	VET-R8	VET-R9	VET-R10	VET-R11
1	1	3334,76*					
1	2	2294,04*	-332,10	8713,05			
1	4	447,30*	-2932,93				
2	1	1949,75*	-564,50				
2	2	1561,22*	-707,05				
2	4		-3448,04		3567,80		6463,14*
2	5	694,25*	-1806,46				
3	1	769,50*	-1350,20				
3	2			1380,19			
3	3	1096,81*	-686,10				
3	4	-1384,76	-3841,18		-955,49	-1135,02	3834,27*
3	5	-299,45	-2517,47		2312,07		4838,88*
4	1	-341,26	-1831,80		1199,06		3103,84*
4	4	-2454,23	-3716,26		-3840,79	-3935,09	112,03*
4	5	-1140,21*	-2703,61				

O símbolo (\*) está associado ao maior  $VET$  do estrato  $i$ , do sítio  $s$  e região  $r$ .

#### 3.4.7.2 Valor do estoque em pé

A planilha VEPCALC calcula o valor líquido das receitas advindas da complementação do manejo ótimo REO para cada estrato, após o término do planejamento. Esta complementação é necessária, para que se possa adicionar o valor do  $VET$  já calculado, após o término da rotação e obter o valor terminal. O arquivo gerado é chamado de  $VEP_{ij}$ .

Através do cálculo do  $VET$  associado a cada regime, de cada estrato, escolhe-se o de maior valor; o regime associado a este  $VET$  foi chamado de REO, regime economicamente ótimo.

Para fazer os cálculos do  $VEP_{ij}$  é necessário fornecer:

- idades de desbastes e corte final do REO ( $desb1, desb2, CR$ );
- idade do estrato no final da planejamento  $i_F$ ;
- o sítio  $s$  ao qual o estrato pertence;
- a região  $r$  ao qual o estrato pertence;
- as produções em  $m^3/ha$  de cada produto;
- os preços dos produtos em  $\$/m^3$ ;
- os custos de manutenção a partir do 2º ano em  $US\$/ha$ ; custos de exploração e administração em  $US\$/m^3$ ;
- ano  $k$  da 1ª poda; a 2ª poda será sempre considerada no ano  $k+4$ .

Em todos os cálculos, que se assemelham aos da planilha VETCALC, são feitos testes para verificar quais atividades têm que ser complementadas após o período de planejamento até concluir a rotação ótima daquele estrato.

Os cálculos da receita líquida  $R$  foram feitos de acordo com a Tabela 35.

TABELA 35: CÁLCULO DA COMPLEMENTAÇÃO DA RECEITA LÍQUIDA COM O REGIME ECONOMICAMENTE ÓTIMO

Se	Complementação da receita líquida com REO
$i_F < Desb1$ do REO	$\frac{VOL_1 \cdot P}{1,06^{Desb1 - i_F}} + \frac{VOL_2 \cdot P}{1,06^{Desb2 - i_F}} + \frac{VOL_{CR} \cdot P}{1,06^{CR - i_F}}$
$Desb1 \leq i_F < Desb2$ do REO	$\frac{VOL_2 \cdot P}{1,06^{Desb2 - i_F}} + \frac{VOL_{CR} \cdot P}{1,06^{CR - i_F}}$
$i_F \geq Desb2$ do REO	$\frac{VOL_{CR} \cdot P}{1,06^{CR - i_F}}$

No cálculo da complementação dos custos de manutenção, pelo regime economicamente ótimo, os cálculos foram feitos de acordo com a Tabela 36, dependendo da idade final do estrato,  $i_F$ .

TABELA 36: CÁLCULOS DA COMPLEMENTAÇÃO DO CUSTO DE MANUTENÇÃO PELO REGIME ECONOMICAMENTE ÓTIMO

Se	Complementação do custo de manutenção com REO
$i_F = 1$	$\frac{MAN2}{1,06^{i_F}} + \frac{MAN3}{1,06^{i_F+1}} + \frac{MAN4}{1,06^{i_F+2}} + \sum_{t=5-i_F}^{CR-i_F} \frac{MAN}{1,06^t}$
$i_F = 2$	$\frac{MAN3}{1,06^{i_F-1}} + \frac{MAN4}{1,06^{i_F}} + \sum_{t=5-i_F}^{CR-i_F} \frac{MAN}{1,06^t}$
$i_F = 3$	$\frac{MAN4}{1,06^{i_F-2}} + \sum_{t=5-i_F}^{CR-i_F} \frac{MAN}{1,06^t}$
$i_F > 3$	$\sum_{t=1}^{CR-i_F} \frac{MAN}{1,06^t}$

No cálculo do custo de exploração e administração, também é verificado se  $i_F < Desb1$  ou  $Desb1 \leq i_F < Desb2$  ou ainda  $i_F \geq Desb2$  gerando o custo  $C_i$  em  $m^3/ha$ .

Se o estrato tiver alguma poda, através dos testes  $i_F < 1^a \text{ Poda} = k$ ,  $k \leq i_F < k+4$  e  $i_F \geq k+4$ , calcula-se o custo de uma ou duas podas ou nenhuma poda nos períodos complementares. Este custo é adicionado em  $C_i$ , fornecendo  $C$ .

O valor líquido presente, do estoque em pé  $VEP$  ao final do período de planejamento  $PP$  é calculado por  $VEP_{ij} = R - C$  em  $PP$ , sendo  $VEP_{ij} = \sum_{t=i_F+1}^{CR_{REO}} \frac{R_t - C_t}{(1 + juro)^t}$  onde receitas e custos são calculados sobre todas atividades ainda por realizar, após o término do período de planejamento até completar o REO do estrato  $i$ .

Uma situação de utilização da planilha está representada na Tabela 37, para um estrato  $i$ , de sítio  $s=1$ , região  $r=1$  e  $REO=6$  (8-12-25) com  $i_F=1$ .

TABELA 37: CÁLCULO DO ESTOQUE EM PÉ NO ESTRATO *i*, REGIME 6 - VEP (*i*,6)

RE O:	6		Estrato:	i						
Desbaste1:	8		Regime:	j						
Desbaste2:	12		Sítio:	1						
Corte raso:	25		Região:	1						
Idade final:	1		Juro:	0,06						
Produções m3/ha:										
	Desbaste1:	Desbaste2:	Corte raso:	Preços P:	Vol x P :	Vol x P :	Vol x P :			
Produtos:	8	12	25		8	12	25			
Scp				9	0	0	0			
L1cp				36	0	0	0			
L2cp				88	0	0	0			
L3cp				110	0	0	0			
Ssp	11,9	60,8	59,1	9	107,1	547,2	531,9			
L1sp		17	224,1	18	0	306	4033,8			
L2sp			278,1	44	0	0	12236,4			
L3sp			151,5	84	0	0	12726			
P	69,8	63	38,1	6	418,8	378	228,6			
En				6	0	0	0			
Soma:	81,7	140,8	750,9		525,9	1231,2	29756,7			
				VL em PP=	8347,600907	0	0			Valor líquido em PP da Receita: VLP total= 8347,60
idade final=1	idade final=2	idade final=3	idade final>3	CUSTOS:						
MAN2	MAN3	MAN4			VOLUME	EXP+CIND2	Vol x Custo			
76,91	72,56	8,02		vol.desb1	81,7	15,18	1240,206	4765,958973		
0	0	0	0	MAN5-T	vol.desb2	140,8	15,18	2137,344	0	
					vol.CR	750,9	15,18	11398,662	0	
143,8684921	0	0	0					4765,958973	4909,83	
Valor líquido das podas em PP:	Ano primeira poda =			0	VLP podas=	0,00	0,00	0,00		
Valor líquido dos custos em PP:	4909,83									
VEP = R - C = em PP	3437,77	Valor do estoque do estrato			i	regime	j	=	3437,77	em PP



## 3.4.7.3 Valor terminal

O cálculo do Valor Terminal, valor líquido presente no ano 0 de planejamento, foi feito na planilha de cálculo VT, após preencher as colunas com algumas informações, tais como apresentadas abaixo:

1ª coluna: estrato  $i$ .

2ª coluna: regime  $j$ .

3ª coluna: sítio  $s$ .

4ª coluna: região  $r$ .

5ª coluna: idade do estrato  $i$  no final do planejamento  $i_F$ .

6ª coluna:  $VET^*_{sri}$ , valor ótimo para o estrato  $i$ , obtido da Tabela 34.

7ª coluna:  $VET^*_i = \frac{VET^*_{sri}}{(1 + juro)^{CR_{REO} - i_F}}$  em PP.

8ª coluna:  $VEP_{ij}$  em PP, obtido através do uso da planilha VEPCALC.

9ª coluna:  $VT_{ij} = VET^*_i + VEP_{ij}$  em PP.

10ª coluna:  $VT_{ij} \leftarrow \frac{VT_{ij}}{(1 + juro)^{PP}}$ , valor presente no início do planejamento.

Na Tabela 38, mostram-se os valores terminais para alguns estratos. Estes resultados são apresentados neste momento para mostrar os arquivos necessários para execução do RESOLVE.

TABELA 38: CÁLCULO DO VALOR TERMINAL EM US\$/ha

estrato	regime	$s$	$r$	$i_F$	$VET^*$	$VET^*$ em PP	$VEP$ em PP	$VT_{ij}$ em PP	$VT_{ij}$ em $k=0$
1	8	1	2	18	8713,1	7754,6	21202,4	28956,7	5041,6
2	9	2	4	15	6463,1	3609,0	16577,2	20186,2	3514,6
.....									
80	7	4	5	15	-1140,2	-636,7	1799,5	1162,8	202,5

Com os valores terminais calculados é formado o arquivo VT.FOR, dispostos da forma matricial  $vt(i,j)$ , com  $i=1, \dots, NE$  e  $j=1, \dots, NR$ , que para o estudo de caso é uma matriz 80 x 11.

O valor terminal do regime 'abandono' é acrescentado diretamente no programa RESOLVE e é calculado através da soma infinita de uma progressão geométrica de razão  $1/1,06$ , cujo primeiro termo é 57,20. Então seu valor para uma rotação infinita é de

$$VT_{j=abandono} = \frac{-57,20}{1 - \frac{1}{1,06}} = -1010,53 \text{ US\$ / ha. O arquivo VT.FOR encontra-se no Anexo 5.}$$

Os valores deste arquivo (VT.FOR) são então acrescentados aos valores dos custos  $c(i,j)$ , do arquivo de custos, da forma  $c(i,j) \leftarrow c(i,j) + vt(i,j)$ ,  $i=1, \dots, NE$  e  $j=1, \dots, NR$ .

### 3.4.8 Coeficientes de produção

#### 3.4.8.1 Introdução

Muitas restrições do modelo florestal dependem de dados relativos aos coeficientes de produção dos estratos considerados. As produções de cada um dos 10 produtos, por sua vez dependem das informações desses estratos, como do seu sítio  $s$ , sua densidade inicial de plantio  $d$ , da região  $r$  onde está localizado o estrato, da característica de ser podado  $P$  ou não-podado  $N$  e do regime de manejo  $reg$ .

Foi utilizado o simulador de crescimento e produção, SISPINUS, que possibilita a simulação de desbastes de florestas de *Pinus*, do crescimento e produção anual do povoamento e o sortimento de madeira por classe diamétrica para usos múltiplos, provenientes de desbastes e do corte final.

Os arquivos de saídas do programa com estas informações, foram chamados de TsdnPreg.SIS para os estratos podados e TsdnNreg.SIS para os não-podados. Com os dados destes arquivos foram criadas as tabelas de produção TsdnP.FOR e TsdnN.FOR.

Foi desenvolvido um programa chamado CRIAESP.FOR para formar os arquivos CPESPi.FOR,  $i=1, \dots, 8$  de produções específicas, escritas numa forma especial e outro programa CRIACPRO.FOR para formar os arquivos CPROi.FOR,  $i=1, \dots, 8$  com os dados de produções máximas, no formato a ser lido posteriormente pelo programa RESOLVE.

#### 3.4.8.2 Utilização do programa SISPINUS para obtenção dos arquivos de dados de produções

##### TsdnP/Nreg.SIS

O programa SISPINUS oferece 9 opções de parâmetros de entrada, que são escolhidos conforme as informações de cada estrato.

Para o parâmetro de entrada da espécie só foi considerado a espécie *Pinus taeda*, já que o estudo de caso só trabalha com esta espécie.

Através das curvas de sítio do *Pinus taeda*, fornecidas pela empresa, o programa foi calibrado para os 5 índices de sítio utilizados conforme a Tabela 39.

TABELA 39: ÍNDICE DE SÍTIO

Classificação de sítio	Índice de sítio - Idade índice 15 anos
I	25 m
II	23 m
III	21 m
IV	19 m
V	17 m

Nos testes feitos para os 4 sítios obteve-se uma produção total média (desbastes + CR) durante 25 anos, conforme os valores apresentados na Tabela 40.

TABELA 40: PRODUÇÃO GLOBAL POR SÍTIO EM m<sup>3</sup>/ha

Classificação de sítio	Produção global média (m <sup>3</sup> /ha)
I	976,6 m <sup>3</sup>
II	808,0 m <sup>3</sup>
III	647,3 m <sup>3</sup>
IV	513,3 m <sup>3</sup>

O SISPINUS apresenta três maneiras de ser inicializado em relação à densidade de plantio, podendo ser através:

- das condições iniciais do povoamento estabelecido;
- pelo número de árvores/ha em dado momento do tempo;
- escolhendo o número de árvores/ha ou área basal /ha ou diâmetro médio quadrático em dado momento do tempo.

Como as informações de densidade de plantio eram conhecidas para todos os estratos, foi escolhido a 1ª condição para iniciar. Havia projetos plantados de 2 x 2,5 m; de 1,8 x 2,8 m e outros de 2 x 3 m, por isso foram consideradas 2 densidades iniciais de plantio,  $d_1 = 1666$  árvores/ha e  $d_2 = 2000$  árvores/ha.

Foi considerado um nível de mortalidade padrão de 5% durante o 1º ano, pois não haviam muitos estudos realizados a respeito.

Foram calculados os dados de produção só nas idades onde haviam desbastes ou corte raso. A idade do primeiro desbaste também dependia se o regime admitia desbaste ou não.

A função de crescimento da altura utilizada foi a equação sugerida pelo próprio SISPINUS.

Foi utilizada uma equação de volume para cada região considerada na execução do modelo.

A forma geral da equação de volume é  $V = e^{B_0 + B_1 \cdot \ln D + B_2 \cdot \ln H}$ , onde  $D = DAP$  em cm,  $H$  altura em metros e  $V$  volume com casca em  $m^3$ . Os valores de  $B_0$ ,  $B_1$  e  $B_2$  fornecidos pela empresa, por região, estão na Tabela 41.

TABELA 41: COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE VOLUME POR REGIÃO

Região	$B_0$	$B_1$	$B_2$
1	-10,25940	2,05869	0,970036
2	-10,23070	1,97536	1,034810
3	-10,07020	2,14489	0,780279
4	-10,55970	1,83134	1,327460
5	-10,05970	2,06351	0,904626

A equação de forma utilizada foi a equação de forma própria do SISPINUS que é uma função polinomial de 4ª ordem,  $D = f(DAP, H_{Total}, H)$ , cuja expressão é dada por

$$D = DAP * (1,2096 \cdot X + 1,7761 \cdot X^2 - 4,6178 \cdot X^3 + 2,8225 \cdot X^4), \text{ onde } X = \frac{H_T - H}{H_T}$$

Na primeira execução foram usadas as dimensões para os 10 produtos, conforme os valores da Tabela 42.

TABELA 42: DIMENSÕES DE TORAS

Produto	Comprimento	Diâmetro mínimo
Laminado	2,7 m	25 cm
Serraria	3,1 m	18 cm
Celulose	1,2 m	8 cm

Para poder identificar o volume para cada um dos três tipos de laminados foi feita uma nova execução considerando os valores da Tabela 43.

TABELA 43: DIMENSÕES DE TORAS PARA LAMINADOS

Produto	Comprimento	Diâmetro mínimo
Laminado L3	2,7 m	45 cm
Laminado L2	2,7 m	35 cm
Laminado L1	2,7 m	25 cm

O processamento inicia-se e ocorre até o primeiro desbaste, fornecendo valores, tais como: a altura dominante, número de árvores/ha, diâmetro médio, altura média, área basal, volume total, *IMA* e *IPA*.

Os novos desbastes foram determinados a partir das informações dos dados da Tabela 44. Tipos de regimes e regimes são conforme citados na Tabela 09.

TABELA 44: IDADE, TIPO E INTENSIDADE DO DESBASTE PARA CADA REGIME

Tipo de regime	Regime	Desbaste 1	Desbaste 2	Corte raso
<i>Pulpwood</i> : p/ processo de fabricação papel	R1	SD	SD	13 anos
	R2	SD	SD	14 anos
	R3	SD	SD	15 anos
<i>Utility</i> : p/ produtos de serraria e laminados	R4, R5, R7	sistemático: linha 6 seletivo: 700árv/ha	seletivo: 300árv/ha	20 anos
	R6	sistemático: linha 6 seletivo: 700árv/ha	seletivo: 300árv/ha	25 anos
<i>Clearwood</i> : p/ produtos podados	R8, R9, R10	seletivo: 700árv/ha	seletivo: 300árv/ha	20 anos
	R11	seletivo: 700árv/ha	seletivo: 300árv/ha	25 anos

Após este processamento foi escolhida a opção de gravar os resultados nos arquivos TsdPreg.SIS ou TsdNreg.SIS dependendo se o estrato for podado ou não. Foram escolhidas tabelas de sortimento e as produções, por classe de *DAP*, gravadas nos arquivos já nomeados.

Obtida a tabela de produção para estratos de *Pinus taeda* seguindo possíveis regimes de 1 até 11, obtiveram-se os dados de produção específicos para os 10 produtos considerados no modelo.

Considerando que os produtos mais nobres tem como diâmetro mínimo valores maiores, o programa retira primeiro a máxima produção específica de laminado L3, depois do L2 e assim por diante. Juntando todos os arquivos TsdP/Nreg.SIS, onde  $reg = j_1, \dots, j_i$  são os regimes que atuam no estrato  $i$ , formam-se as tabelas TsdP.FOR e TsdN.FOR que são matrizes de dimensão (23 x 11) da forma como se apresentam na Tabela 45, para uma situação particular,  $s=4$ ,  $d=2$ ,  $r=1$  e  $N$ .

Na Tabela 45 tem-se em cada linha, na 1ª coluna, a idade do estrato em que ocorrerá o desbaste ou corte final e nas demais colunas as produções em  $m^3/ha$  de cada um dos 10 produtos considerados.

Sabendo-se que a produção de um produto mais nobre pode ser utilizada para um menos nobre quando necessário, exceto no caso de processo, que tem limitação máxima de diâmetro, trabalha-se no modelo com o coeficiente de produção máximo de cada produto, que é representado pela máxima produção possível da árvore para aquele determinado produto. O coeficiente de produção máximo é uma soma particular de coeficientes de produção específicos, conforme apresentado na seção 3.1.2.3.







Em relação ao modelo básico, cada arquivo CPESPi.FOR conterá informações de 10 estratos, já que existem ao todo 80 estratos.

Chama-se bloco o grupo formado pelos 10 estratos, sobre os quais são informadas as produções no arquivo CPESPi.FOR.

Para executar o programa são lidos os arquivos do tipo ESCOLH*i*.FOR,  $i=1, \dots, 8$  que informam quais regimes atuam em cada estrato do bloco considerado. Dependendo das informações do estrato considerado no bloco, abre-se a tabela TsdrP.FOR ou a tabela TsdrN.FOR.

Os arquivos criados CPESPi são matrizes de dimensão  $(NCORMAX \cdot NR \cdot NEBLOCO)$  x  $(NP + 1)$ , que no modelo básico assume o valor de  $550 \times 11$ .

Para criar estes arquivos algumas considerações foram feitas:

- São reservadas 5 linhas para os dados de produção específicos de cada estrato do bloco e cada regime, pois podem ocorrer durante o período de planejamento até 5 cortes entre desbastes e cortes rasos ( $NCORMAX=5$ ). Se ocorrerem menos do que 5, as linhas restantes serão preenchidas com zeros.
- Se um determinado regime não atua sobre um certo estrato suas 5 linhas serão preenchidas com produções nulas.
- Na primeira coluna da matriz está representado o período de planejamento que ocorrerá o desbaste ou corte raso. Por exemplo, se o estrato E1 tem 6 anos de idade e supondo que o regime R5 (8-12-20) atua nele, os valores de  $p_{5,1}$  até  $p_{5,5}$  assumirão os períodos de planejamento 2, 6, 14, 23 e 26, quando haverá produção de cada um dos produtos considerados. O próximo valor de  $p$  seria  $p_{5,6} = 20 - 6 + 1 + 20 = 33$  que é maior que o horizonte de 30 anos que está sendo considerado. Neste caso como nos outros, ocorre no máximo 5 cortes em todo o horizonte de planejamento. Adicionou-se um ano após o primeiro corte

roso, pois se está supondo que entre o *CR* e uma nova implantação existe um período de um ano para acertos.

#### 3.4.8.4 Utilização do programa CRIACPRO.FOR para obtenção dos arquivos de produções máximas

O programa CRIACPRO.FOR gera os arquivos de produções máximos CPROi.FOR associados aos arquivos de produções específicos CPESPi.FOR.

Este programa simplesmente soma as produções específicas convenientes e gera um arquivo do mesmo tamanho que o anterior.

Os novos arquivos CPROi.FOR, para  $i=1,\dots,8$  é que serão usados no programa RESOLVE.FOR.

Foi desenvolvido outro programa PGLOBAL.FOR que gera as tabelas de produções globais TAsdrP/N.FOR que foram usadas no programa de custos.

As tabelas são da forma apresentada na Tabela 47, sendo que a primeira coluna representa a idade de corte do regime e a segunda, a produção total esperada naquela idade .

As idades de cortes por regime (conforme Tabela 09) são apresentadas em seqüência por linha, um regime após o outro. Por exemplo a idade 13 da 1ª linha se refere ao regime 1 e as idades 11 e 25 das duas últimas linhas se referem ao regime 11.

Tanto o programa CRIAESP.FOR quanto o CRIACPRO.FOR foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN.

TABELA 47: DADOS DE PRODUÇÃO GLOBAL EM m<sup>3</sup>/ha PARA OS 11 REGIMES, EM UM ESTRATO NÃO-PODADO, DE SÍTIO 4, DENSIDADE DE PLANTIO 2 E REGIÃO 1  
ARQUIVO: TA421N.FOR

Idade	Produção global (m <sup>3</sup> /ha)
13	334,60
14	389,60
15	434,90
10	80,00
14	95,00
20	270,90
8	44,80
12	68,20
20	286,70
8	44,80
12	68,20
25	427,20
9	60,90
13	81,40
20	277,90
10	0,00
20	0,00
11	0,00
20	0,00
12	0,00
20	0,00
11	0,00
25	0,00

### 3.5 SIMULAÇÕES COM O MODELO BÁSICO

#### 3.5.1 Introdução

Na modelagem de uma situação real, o número de variáveis a serem consideradas em geral é muito grande, por isso sempre se faz necessário simplificar a situação através de certas hipóteses.

Em modelos de PL, a 1ª hipótese implícita é de que os coeficientes usados são proporcionais às variáveis, sendo que as relações do tipo custo/ha, preço/m<sup>3</sup> são constantes e independentes da área considerada ou volume explorado, isto é, não se está considerando economia de escala. Outras hipóteses são: o nível de atividade de uma variável não interfere no nível da outra e as variáveis são contínuas.

Considera-se normalmente a estimativa do valor esperado de todas as variáveis necessárias para alimentar o modelo, sejam elas obtidas por medições em campo ou avaliações históricas da própria empresa. Para executar o modelo de PL, supõe-se que essas variáveis são conhecidas com certeza ou pelo menos com segurança e por isso não se associa risco a elas. Porém oscilações são esperadas nestas variáveis e dependendo do grau do erro esperado, várias técnicas são sugeridas na literatura.

Uma análise paramétrica é útil quando não se conhece com certeza um determinado grupo de variáveis e se dispõe de informações de como elas possivelmente estão variando. Para analisar piores e melhores casos, uma análise sistemática de cenários pode ser feita. Se erros ocorrem em várias variáveis, o uso de simulações é conveniente para representar a situação real.

Neste estudo de caso podem ocorrer erros ou falta de informações corretas em custos de manejo, nos preços de produtos produzidos, na área disponível, nas demandas dos

produtos, no volume máximo de compra de madeira para processo, no volume máximo de corte de madeira e nos coeficientes de produção.

Erros nos custos e preços interferem na Função Objetivo; variações em dados de área, demandas, volume máximo de compra para processo ou volume máximo de corte global interferem no vetor dos recursos do modelo (*RHS*) e erros nos coeficientes de produção, alteram a matriz tecnológica *A* e a Função Objetivo.

SHIMIZU (1973), define simulação como sendo essencialmente um trabalho com analogias. É uma modalidade experimental de pesquisa que procura tirar conclusões através de exercícios com modelos que representem a realidade. Tais modelos podem conservar ou não, as características físicas e lógicas do sistema imitado.

Quando as características físicas e lógicas são mantidas, tem-se o que se chama de simulação física.

Quando o modelo não conserva as características físicas do sistema real, tem-se o que se chama de simulação simbólica. Neste caso, a parte lógica é conservada e expressa através de várias equações matemáticas, quando possível.

A simulação simbólica, ou método de Monte Carlo ou simplesmente simulação pode ser usada em dois tipos de problemas: simulação de problemas determinísticos e simulação de problemas estocásticos ou probabilísticos.

A simulação de problemas estocásticos abrange os casos mais comuns e importantes da simulação, pois tais problemas por sua natureza estocástica não podem ser resolvidos através de métodos matemáticos usuais e a simulação é o melhor, ou muitas vezes, o único método de resolução.

Através da simulação pode-se:

- identificar problemas que podem ocorrer ao longo do planejamento, como faltas na produção, não atendimento de demandas, entre outros;
- testar hipóteses em relação a alguma decisão específica;
- antever situações futuras, após simular tal situação.

Foi escolhida a simulação estocástica pela natureza do problema que está sendo resolvido e porque ela é uma técnica com a qual pode-se fazer a avaliação de risco de um modelo de planejamento qualquer.

O processo de simulação desenvolvido neste trabalho depende de:

1. Estabelecer distribuições de probabilidades para os valores das variáveis a serem simuladas. Algumas fontes destas informações são: as opiniões de conhecedores do comportamento das variáveis e o comportamento passado das variáveis, supondo válido o uso de distribuições de frequências passadas como indicação do seu comportamento usual. A simulação pode manter as características dos dados, como por exemplo, sua média e o desvio padrão.
2. Definir o risco, através do coeficiente de variação. Espera-se que quanto maior o risco maior seja o retorno desejado.

O modelo básico apresentado na seção 3.1.4, considerou os valores esperados dos coeficientes de produção, dos custos de manejo, dos preços e demandas dos produtos, com solução ótima dada por  $x_{bas}$  e valor da função objetivo por  $FO_{bas} = z^*$ .

Para se analisar como a receita  $z^*$  poderia alterar perante alguma perturbação do ambiente e como as decisões administrativas sofreriam modificações, vai-se representar a realidade através de simulações.

Através de análise de situações reais ocorreu a necessidade de se avaliar 3 casos:

1. Caso onde os valores medidos variam em torno da média esperada, com valores concentrando-se em torno desta média com maior probabilidade do que longe dela. Considerando-se várias situações reais possíveis, cada variável aleatória foi perturbada com ruído normal de acordo com diversos coeficientes de variação. Este é considerado o caso mais comum.
2. Caso onde os dados variam dentro de um intervalo com a mesma probabilidade. Será usado o modelo de distribuição uniforme, com diversas amplitudes, para simular várias situações possíveis. É considerado o caso mais crítico.
3. Caso onde os dados são obtidos de uma forma tendenciosa: ou para mais ou para menos do valor real. Nesta situação os dados serão alterados sistematicamente, sendo multiplicados por um valor constante.

Foi desenvolvido um simulador específico para trabalhar com tais situações, o SIMULA, com a possibilidade de se escolher o tipo de perturbação. No programa, quando a perturbação for estocástica, ela poderá ser normal ou uniforme. Podem ser feitas também simulações sistemáticas.

Também pode-se considerar que as variações dadas aos coeficientes de variação ou amplitudes dependam do tempo ou do período que se está sendo analisado ; o risco associado a algumas variáveis pode variar com o período  $k$  . Por exemplo, o risco nos preços  $P_{ik}$  aumenta com o aumento de  $k$  ; o risco nos custos  $c_{ij}$  aumenta com o aumento de  $k$  ; o risco em  $VMAX_k$  aumenta com o aumento de  $k$ , o risco em  $VMCP_k$  aumenta com o aumento de  $k$ , o risco das demandas  $D_{ik}$  aumenta com o aumento de  $k$ . Por outro lado, coeficientes de produção e área são dados que não alteram diretamente em função do tempo.

Foram realizadas simulações com coeficientes de variação e amplitudes constantes durante todos os períodos . Poder-se-ia considerar o  $CV$  variável no tempo  $k$ , sendo que



quanto maior  $k$ , maior o limite de risco em relação à média do coeficiente. Por exemplo, em relação aos preços  $P_{lk}$ , que são conhecidos com mais confiança no início do planejamento do que no final poder-se-ia considerar em cada período,  $CV$  variável no tempo, aumentando conforme  $k$  aumenta. Uma situação poderia ser  $(P_{lk})_{pert} = P_{lk} + \varepsilon_{lk}$ , onde  $P_{lk}$  é o valor médio e  $\varepsilon_{lk}$  uma perturbação com distribuição conhecida. Fazendo  $(P_{lk})_{pert} = P_{lk} + \varepsilon \cdot s$ , com  $\varepsilon \sim N(0,1)$  e  $CV_k = \frac{k^2}{PP}$ , então  $(P_{lk})_{pert} = P_{lk} + \varepsilon \cdot CV_k \cdot P_{lk}$  sendo que a variável  $P_{lk}$  é perturbada segundo uma distribuição com  $CV$  variável no tempo  $k$ .

THOMPSON e HAYNES (1970) sugerem em seu artigo, os limites de variação variáveis no tempo, da forma  $L_k = \overline{P_{lk}} \cdot c \cdot \log(k)$ ,  $k = 2, \dots, PP$  e  $L_1 = \overline{P_{l1}}$ , onde  $c$  é determinado por estimativa nos primeiros dois períodos. Neste caso está se perturbando uniformemente no período  $k$ , com amplitude aumentando conforme  $k$  vai aumentando, da forma  $(P_{lk})_{pert} = P_{lk} + \varepsilon_{lk}$ ,  $\varepsilon_{lk} \sim U(-L_k, L_k)$ , com semi amplitude de  $L_k = \overline{P_{lk}} \cdot c \cdot \log(k)$ .

### 3.5.2 Simulações estocásticas

#### 3.5.2.1 Simulações normais

Seja  $X$  variável aleatória,  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  tal que  $prob(X \leq x) = F(x)$ , então tem-se:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) \cdot dt \quad \text{com} \quad f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2}, \quad \text{onde } \mu \text{ é a média e } \sigma \text{ o desvio}$$

padrão da variável aleatória. Neste caso a média amostral  $\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i$  é uma estimativa de

$$\mu \text{ e o desvio padrão amostral } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \text{ é uma estimativa de } \sigma.$$

No modelo florestal da seção 3.1.4, algumas variáveis podem ser consideradas variáveis aleatórias do tipo da variável  $X$ . Supõe-se que  $X \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$ , onde para efeito de simulação assume-se  $\mu_0 = \bar{X}$  e  $X = \bar{X} + s \cdot \varepsilon$  onde  $\bar{X}$  e  $s$  vêm de uma amostra real e  $\varepsilon$  é um ruído com distribuição  $N(0,1)$ , a normal padrão.

Supõem-se conhecidos os parâmetros de cada variável aleatória, isto é, seja  $X$  v.a. tal que  $\mu$  e  $\sigma$  são conhecidos. Então, para se gerar outros valores com distribuição normal em torno de  $\mu$ , supõe-se que o ruído  $\varepsilon$  tenha distribuição normal padrão  $\varepsilon \sim N(0,1)$ . Então

$X = \mu + \sigma \cdot \varepsilon$  é tal que  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , pois:

$$E(X) = E(\mu + \sigma \cdot \varepsilon) = \mu + \sigma \cdot E(\varepsilon) = \mu + 0 = \mu \quad \text{e}$$

$$V(X) = V(\mu + \sigma \cdot \varepsilon) = 0 + \sigma^2 \cdot V(\varepsilon) = \sigma^2 \cdot 1 = \sigma^2.$$

Métodos de geração de  $\varepsilon$ , que limitam os valores gerados entre  $[-3 \cdot \sigma, +3 \cdot \sigma]$  são insatisfatórios pois impedem que apareçam valores grandes em módulo, bem afastados, nas caudas da distribuição. A probabilidade de uma variável normal exceder, em módulo, 3 desvios padrões é cerca de 0,26%.

Nos primeiros testes feitos, usou-se o gerador normal sugerido por SPAIN (1982), através da fórmula empírica  $N_d = 0,603 \cdot \ln\left(\frac{R_u}{1-R_u}\right)$ , onde  $R_u$  tem distribuição uniforme,  $R_u \sim U(0,1)$ ;  $N_d$  um número aleatório normal tal que  $N_d \sim N(0,1)$ . Então  $R_n = M + s \cdot N_d$  é um número normal randomicamente distribuído com média  $M$  e desvio padrão  $s$  fixados sendo:

$$E(R_n) = E(M + s \cdot N_d) = M + s \cdot E(N_d) = M \quad \text{e}$$

$$V(R_n) = V(M + s \cdot N_d) = 0 + s^2 \cdot V(N_d) = s^2.$$

Este método empírico tem o inconveniente de só gerar elementos entre 3 desvios padrões. O número aleatório  $R_u$  é gerado no microcomputador, cuja semente é alterada em função do tempo.

No livro Estatística Computacional, DACHS (1988) sugere dois outros métodos para gerar números aleatórios seguindo uma distribuição normal. Estes métodos estão apresentados a seguir.

### 1º método:

Se  $U(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  são variáveis aleatórias independentes e uniformes em  $(0,1)$ , então

$$\frac{S(n) - E(S(n))}{\sqrt{V(S(n))}} \rightarrow N(0,1) \text{ quando } n \rightarrow \infty, \text{ onde } S(n) = U(1) + \dots + U(n), \text{ } E(S(n)) \text{ é o}$$

valor esperado e  $V(S(n))$  é a variância de  $S(n)$ . Este resultado não é mais do que o Teorema Central do Limite, o principal resultado do Cálculo de Probabilidades.

Tem-se que  $E(S(n)) = \frac{n}{2}$  e  $V(S(n)) = \frac{n}{12}$ , pois com  $U(i) \sim U(0,1)$ , então  $f(U(i)) = 1$  e

$$E(U(i)) = \int_0^1 u_i \cdot f(u_i) du_i = \int_0^1 u_i \cdot 1 du_i = \frac{1}{2} \Rightarrow E(S(n)) = E\left(\sum_{i=1}^n U(i)\right) = \frac{n}{2} \text{ e}$$

$$V(U(i)) = \int_0^1 \left(u_i - \frac{1}{2}\right)^2 \cdot f(u_i) du_i = \int_0^1 \left(u_i - \frac{1}{2}\right)^2 \cdot 1 du_i = \frac{1}{12} \Rightarrow$$

$$V(S(n)) = V\left(\sum_{i=1}^n U(i)\right) = \sum_{i=1}^n V(U(i)) = \frac{n}{12}.$$

Fazendo  $n \rightarrow \infty$  e considerando-se o valor médio tem-se:

$$\frac{S(n) - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} = \frac{S(n) - 1}{\sqrt{\frac{1}{12 \cdot n}}} \rightarrow N(0,1). \text{ Assim, para se gerar um número aleatório } N(0,1), \text{ gera-se}$$

pela função *randon*  $n$  uniformes entre 0 e 1, tira-se a média, subtrai-se  $\frac{1}{2}$  e divide-se por  $\sqrt{\frac{1}{12 \cdot n}}$ , obtendo-se  $z_i \sim N(0,1)$ .

### 2º método:

Segundo DACHS (1988), Box e Muller desenvolveram em 1958, um método para gerar valores normais  $N(0,1)$ .

A idéia básica do método é considerar  $(V_1, V_2)$  um ponto aleatório no círculo unitário centrado na origem e fazer  $S = V_1 \cdot V_1 + V_2 \cdot V_2$ . Prova-se usando o método do Jacobiano que,

sendo  $X_1 = V_1 \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot \ln S}{S}}$  e  $X_2 = V_2 \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot \ln S}{S}}$ , então  $X_1$  e  $X_2$  têm distribuição normal e são independentes, isto é,  $X_1 \sim N(0,1)$ ,  $X_2 \sim N(0,1)$ .

Um ponto  $(V_1, V_2)$ , distribuído uniformemente no círculo  $C(0,1)$  é gerado da seguinte forma:

- geram-se valores uniformes entre  $(0,1)$ ,  $U_1$  e  $U_2$ ;
- calculam-se  $V_1 = 2 \cdot U_1 - 1$ ,  $V_2 = 2 \cdot U_2 - 1$ ;  $V_1$  e  $V_2$  são uniformes em  $(-1,1)$ ;
- consideram-se apenas os pares tais que  $V_1^2 + V_2^2 < 1$ , pois estes pertencem ao círculo de centro em 0 e raio igual a 1.

Este método é o que foi programado no simulador, para gerar os números aleatórios normais, devido ser o tradicionalmente usado na estatística e apresentar bons resultados a bastante tempo.

A variável gerada será obtida por  $X_{pert} = \bar{X} + s \cdot R_u$ . Fazendo-se  $CV = \frac{s}{\bar{X}}$ , onde  $\bar{X}$  e  $s$  são informações preliminares amostrais,  $R_u \sim N(0,1)$  qualquer número aleatório normal segundo o método de Box e Muller, então  $X_{pert} = \bar{X} + CV \cdot \bar{X} \cdot R_u = \bar{X} \cdot (1 + CV \cdot R_u)$ . Logo,  $X_{pert} \sim N(\bar{X}, s^2)$  e observa-se que se  $\bar{X} = 0 \Rightarrow X_{pert} = 0$ .

### Teste de Gaussianidade: Teste de Filliben

Para verificar se os dados reais obtidos da resolução do modelo de PL, que são as Funções Objetivos  $FO$ , pertencem a uma distribuição normal pode ser feito:

(1°) Um histograma, para se observar visualmente a simetria da curva.

(2°) Gráfico de probabilidade normal, cuja seqüência pode ser resumida nos seguintes passos:

- ordenar as observações originais  $x(i)$ ;
- calcular os quantis normais padrões  $q(i)$ ;
- fazer o gráfico dos quantis  $q(i)$  e as observações ordenadas  $x(i)$ , para verificar se estão linearmente relacionadas.

Na Tabela 48, se  $P(x \leq q(i)) = p(i) = \frac{i - 0,5}{n}$ , então  $q(i)$  pode ser determinado pela

função inversa da distribuição normal padrão,  $INVNOR(0,1)$ , ou seja  $\Phi^{-1}(X)$  onde

$$\Phi(X) = \int_{-\infty}^X \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2} dx.$$

Como  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , então  $Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0,1)$ , por definição, e  $X = \mu + \sigma \cdot Z$  é a

relação linear entre  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  e  $Z \sim N(0,1)$ . Assim, constrói-se uma tabela com valores

de  $Z$  (que são os quantis) e para os valores ordenados de  $X$ , se  $X$  é Gaussiano, a relação linear existirá e isto é evidenciado pelo coeficiente de correlação entre  $X$  e  $Z$ .

TABELA 48: OBSERVAÇÕES x QUANTIS

Observações ordenadas $x(i)$	Nível de probabilidade $p(i)$	Quantil normal padrão $q(i)$
$x(1)$	$(1-0,5)/n$	$q(1)$
$x(2)$	$(2-0,5)/n$	$q(2)$
.....	.....	.....
$x(n)$	$(n-0,5)/n$	$q(n)$

(3° ) O teste de FILLIBEN (1975) está baseado na linearidade do gráfico  $q(i)$  x  $x(i)$ , calculando o coeficiente de correlação dos pontos  $q$  e  $x$ . O coeficiente de correlação dos pontos do gráfico de probabilidade normal é definido por:

$$r_Q = \frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x}) \cdot (q(i) - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (q(i) - \bar{q})^2}}$$

O teste é feito sobre a hipótese  $H_0$ : a distribuição de  $X$  é normal.  $H_0$  é rejeitada a um nível de significância  $\alpha$  se  $r_Q < r_T$ , onde  $r_T$  é um valor tabelado apresentado no artigo de FILLIBEN (1975) e referenciado no livro do JOHNSON et al. (1988).

Simulações estocásticas normais foram realizadas em dados de produção, nos custos de manejo, nos preços dos produtos e nas demandas dos produtos.

Em relação aos dados de produção:

Foram feitas simulações com  $CV=10, 20$  e  $30\%$  e os resultados da Função Objetivo  $FO$  foram gravados em arquivos. O motivo dos coeficientes de variação variarem até  $30\%$  é

que, após a aleatorização, não ocorra uma situação em que o coeficiente aleatorizado assuma valores não condizentes com a realidade. Por exemplo, se:

$$A_{Ran} = \bar{A} \pm 3.S, \quad CV = \frac{S}{\bar{A}}, \quad A_{Ran} = \bar{A}(1 \pm 3.CV) \text{ e para ter-se } A_{Ran} > 0, \text{ então } 1 - 3.CV > 0$$

ou  $CV < 0,333\dots$ . Usa-se  $CV \leq 30\%$ , por segurança.

Todas as simulações foram consideradas, pois as inactíveis foram factibilizadas. Foi feito uma estatística dos resultados gerados, sendo testados quanto à normalidade através do teste de Filliben.

O mesmo procedimento foi utilizado para as outras variáveis.

### 3.5.2.2 Simulações uniformes

Em algumas circunstâncias mais críticas, pode-se analisar a situação em que o valor conhecido da variável estudada teria igual probabilidade de acontecer dentro de um certo intervalo de variação e, esta é única informação que se tem. Isto sugere que se façam simulações usando a distribuição uniforme para representar tal situação, ou seja uma situação de desconhecimento quase completo dos valores de ocorrência dos resultados.

Se  $X$  é uma variável aleatória com distribuição uniforme, então  $X$  se distribui com igual probabilidade num intervalo  $[a,b]$ ; a sua função densidade de probabilidade é  $f(t) = \frac{1}{b-a}$ ,

$a \leq t \leq b$  e zero para os outros valores e a sua função de distribuição é dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t).dt = P(X \leq x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, a] \\ \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b] \\ 1, & x \in (b, \infty) \end{cases}$$

com média  $\mu = \frac{a+b}{2}$  e variância  $\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$ .

O sistema SIMULA também foi adaptado para fazer simulações uniformes.

Após se escolher a variável que irá aleatorizar, o programa pede os valores dos limites inferior (*lim inf*) e superior (*lim sup*) do intervalo de validade da distribuição. Neste caso, se a semi-amplitude *sa* da distribuição é  $sa = (\alpha \cdot \text{valor médio})$ , define-se  $\text{lim inf} = \bar{X} - sa$  e  $\text{lim sup} = \bar{X} + sa$ . Alguns valores dos limites estão representados na Tabela 49.

TABELA 49: VALORES DOS LIMITES INFERIOR E SUPERIOR USADOS NA DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

Valores de $\alpha$	limite inferior	limite superior
1/3	0,666...	1,333...
0,5	0,5	1,5
2/3	0,333...	1,666...
1	0	2

A variável  $X$  é aleatorizada segundo uma distribuição uniforme, através da fórmula  $X_{pert} = \bar{X} + \bar{X} \cdot (2R-1) \cdot (\text{Lim sup} - \text{Lim inf})/2$ , sendo  $\bar{X}$  a estimativa do valor esperado. Se  $R$  representa um número randômico no intervalo (0,1), então  $2R-1$  é número randômico em (-1,1) e com a semi-amplitude, *sa*, dada por  $sa = \bar{X} \cdot (\text{Lim sup} - \text{Lim inf})/2$ , tem-se  $X_{pert}$  um valor aleatorizado no intervalo  $(\bar{X} - sa, \bar{X} + sa)$ , ou seja  $X_{pert} \sim U(\bar{X} - sa, \bar{X} + sa)$ .

A simulação foi feita para os coeficientes de produção, gerando dados em arquivos. Foi realizado o teste de Filliben para verificar a normalidade das saídas de cada grupo de simulações feitas.



### 3.5.3 Cenários sistemáticos

Através da simulação sistemática, obtém-se uma visão comportamental do risco, pela análise de sensibilidade do projeto, que consiste em se considerar inúmeras situações possíveis da realidade.

Esta é uma abordagem grosseira, porém fornece aos gerentes uma ampla visão das piores e melhores possibilidades de retorno, ganhando-se uma percepção da variabilidade dos resultados.

Os retornos financeiros podem ser estimados para as seguintes situações: mais pessimista  $R_1$ , que representa os piores casos; mais provável  $R_2$ , que representa o caso esperado; mais otimista  $R_3$ , que simula os melhores casos.

Neste cenário o risco pode ser refletido pela faixa de variabilidade, que pode ser considerado como uma medida básica de risco.

Se as probabilidades de ocorrência de cada caso são conhecidas e iguais a  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$  respectivamente, pode-se calcular o valor esperado do retorno do empreendimento por:

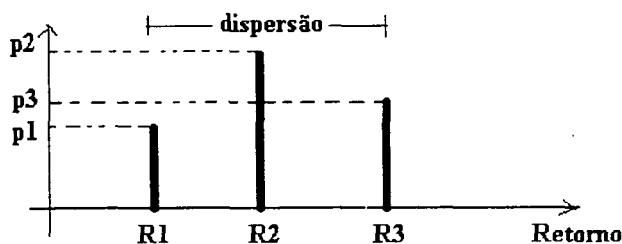
$$VE = R_1 p_1 + R_2 p_2 + R_3 p_3 = E(FO), \text{ onde } E(FO) \text{ é o retorno esperado.}$$

Embora o valor esperado possa não ser o valor monetário realmente recebido, ele é um indicador do retorno provável e função da obtenção de melhor amostra. Porém, o mais importante desta análise não é o valor esperado, mas sim o intervalo de confiança em que se situam os piores e os melhores resultados.

Através de um gráfico de barras como o da Figura 13, pode-se analisar a faixa de retorno ou a dispersão do projeto.

Foram propostos, através de estudos de casos, vários cenários sistemáticos com variações em coeficientes de produção, custos de manejo, demandas e preços dos produtos.

FIGURA 13: RETORNO DE PROJETOS



Em relação aos dados de produção:

Reduzindo ou aumentando sistematicamente os coeficientes de produção observam-se alterações na Função Objetivo, que dependem do tipo de variação dada, isto é, ser sistemática para mais ou ser sistemática para menos.

Vários cenários foram executados, a saber:

- (1) **cenário otimista** : foram aumentados todos os coeficientes de produção de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em relação ao valor médio usado no problema básico.
- (2) **cenário provável** : foi considerado o problema básico com as estimativas dos valores médios .
- (3) **cenário pessimista** : foram diminuídos todos os coeficientes de produção das mesmas porcentagens acima, em relação ao problema básico.

Pode ocorrer que, na amostragem, durante a obtenção dos dados, erros sistemáticos ocorram, como erros de medida nos instrumentos, para mais ou para menos, falta de calibragem nos instrumentos entre outros. Por isso tais simulações são importantes para avaliar o comportamento da Função Objetivo em tais cenários.

Foi usado o sistema SIMULA adaptado também para fazer simulações sistemáticas. Os resultados da *FO* foram gravados em arquivo e foi feita uma estatística dos resultados.

Procedeu-se de forma análoga em relação aos outros dados.

### 3.5.4 SIMULA.FMK . Sistema completo de simulações

Foi criado o sistema SIMULA.FMK para ser utilizado quando se quiser perturbar qualquer variável aleatória que consta dos arquivos de área, demanda, preço, custo de manejo, volume máximo de compra de madeira para processo, volume de controle de corte global ou coeficiente de produção.

A idéia básica é considerar a variável que se quer aleatorizar e perturbá-la segundo um ruído com distribuição escolhida ou através de uma perturbação sistemática e depois jogar os dados alterados pela perturbação em outro arquivo, chamado arquivo tipo \*RA.FOR. O termo 'RA' foi usado para dizer que o arquivo foi 'RAndomizado'. Quando se deseja fazer a aleatorização dos coeficientes de produção, é necessário alterar também o arquivo de custos de manejo, pois estes dependem da produção total cortada, que foi aleatorizada.

O sistema SIMULA.FMK é composto dos seguintes programas:

SIMULA.FOR	⇒	programa principal.
CARQS( )	⇒	subrotina para calcular os custos em função da produção global.
CRIAESPS( )	⇒	subrotina que gera automaticamente os arquivos de produção específicos .
RESOLVES( )	⇒	subrotina que executa o SIMPLEX REVISADO e o GUB .

As subrotinas CARQS, CRIAESPS e RESOLVES estão baseadas nos programas CARQ, CRIAESP e RESOLVE, respectivamente, já citados nas seções 3.4.6.2, 3.4.8.3 e 3.3.2.

Para executar o sistema, supõe-se que o simulador de produções SISPINUS, ou qualquer outro, já tenha sido acionado e que as tabelas TsdrP.FOR, TsdrN.FOR, com os dados

de produção já tenham sido criadas. São necessárias tantas tabelas quantas forem as quantidades de índices de sítio  $s$ , densidades de plantio  $d$ , regiões  $r$ , estratos podados  $P$  e estratos não podados  $N$ .

Outro cuidado que tem que ser tomado é que inicialmente todos os arquivos tipo \*RA.FOR tem que ser iguais aos originais não randomizados . Por exemplo, se a aleatorização for feita nas variáveis do modelo básico, os arquivos serão os seguintes:

ARERA	≡	AREA2
PRECRA	≡	PREC
VXRA	≡	VX2
VCPRA	≡	VCP4
DEMRA	≡	DEMAN2
CUSTORA	≡	CUSTO22
CPRORAi	≡	CPRO22i.

Quando a simulação é feita através da distribuição normal é necessário fornecer o coeficiente de variação  $CV$  da mesma, conforme justificado na seção 3.5.2.1.

Se for utilizado a distribuição uniforme, os valores dos limites inferior e superior da distribuição têm que ser fornecidos, de acordo com a seção 3.5.2.2.

Se forem representados cenários sistemáticos, uma constante ALFA de multiplicação dos dados alterados deve ser inserida no programa.

A seqüência de execuções do sistema SIMULA.FMK é a seguinte:

## 1º CASO) PERTURBANDO OS COEFICIENTES DE PRODUÇÃO

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática).
2. São gerados os arquivos TsdrPRA.FOR e TsdrNRA.FOR, que são as tabelas de produções específicas randomizadas ; e posteriormente os arquivos TAsdrNRA.FOR e TAsdrPRA.FOR. Estes dois últimos arquivos além da idade do estrato, possuem as produções globais, soma das produções de todos os produtos, de cada estrato em cada ano de corte, depois que os coeficientes de produção foram aleatorizados.
3. A subrotina CARQS é chamada e com os arquivos gerados tipo TAsdrNRA.FOR e TAsdrPRA.FOR são calculados os custos de manejo gerando o arquivo CUSTORA.FOR . O arquivo de custos teve que ser calculado novamente, pois a produção global mudou, após a aleatorização.
4. Com os arquivos TsdrPRA.FOR e TsdrNRA.FOR são gerados os arquivos de produções específicas CPESPRAi.FOR,  $i=1, \dots, 8$  através da subrotina CRIAESPS. Depois o programa SIMULA gera os arquivos de produções máximas randomizados CPRORAi.FOR, para  $i=1, \dots, 8$ .
5. Com os novos arquivos de custo e de produções que foram afetados pela aleatorização dos coeficientes de produção, chama-se a subrotina RESOLVES, que executa o SIMPLEX REVISADO com o GUB, para resolver o modelo.
6. Os resultados são gravados no arquivo FOXVT.FOR, onde a Função Objetivo é a primeira informação e nas demais linhas estão os valores das variáveis básicas, na ordem em que aparecem na base ótima ; só o valor da Função Objetivo é levado para o arquivo FOBJVT-M.FOR.
7. As variáveis de decisão de manejo são gravadas nos arquivos FOXVT-M\*.FOR.

## 2º CASO) PERTURBANDO OS PREÇOS

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática).
2. Abre-se o arquivo original de preços e perturbam-se as variáveis que representam os preços. As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo PRECRA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são jogados nos arquivos FOXVT.FOR e FOXVT-P\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-P.FOR.

## 3º CASO) PERTURBANDO OS CUSTOS DE MANEJO

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática).
2. Abre-se o arquivo original de custos e perturbam-se as variáveis de custo de manejo. As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo CUSTORA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são jogados nos arquivos FOXVT.FOR e FOXVT-C\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-C.FOR.

## 4º CASO) PERTURBANDO O ARQUIVO DE VOLUME MÁXIMO PERMITIDO DE CORTE GLOBAL DE MADEIRA

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática).
2. Abre-se o arquivo original de volume máximo de corte global e perturbam-se as variáveis que representam o volume máximo de corte. As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo VXRA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são jogados no arquivo FOXVT.FOR e FOXVT-X\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-X.FOR.

#### 5º CASO) PERTURBANDO O ARQUIVO DE VOLUME MÁXIMO PERMITIDO DE COMPRA DE MADEIRA PARA PROCESSO

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática).
2. Abre-se o arquivo original de volume máximo de compra VMCP e perturbam-se as variáveis de volume máximo de compra. As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo VCPRA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são gravados nos arquivos FOXVT.FOR e FOXVT-V\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-V.FOR.

## 6º CASO) PERTURBANDO O ARQUIVO DE ÁREA

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática ).
2. Abre-se o arquivo original de área e perturbam-se as variáveis de área. As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo ARERA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são jogados nos arquivos FOXVT.FOR e FOXVT-A\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-A.FOR .

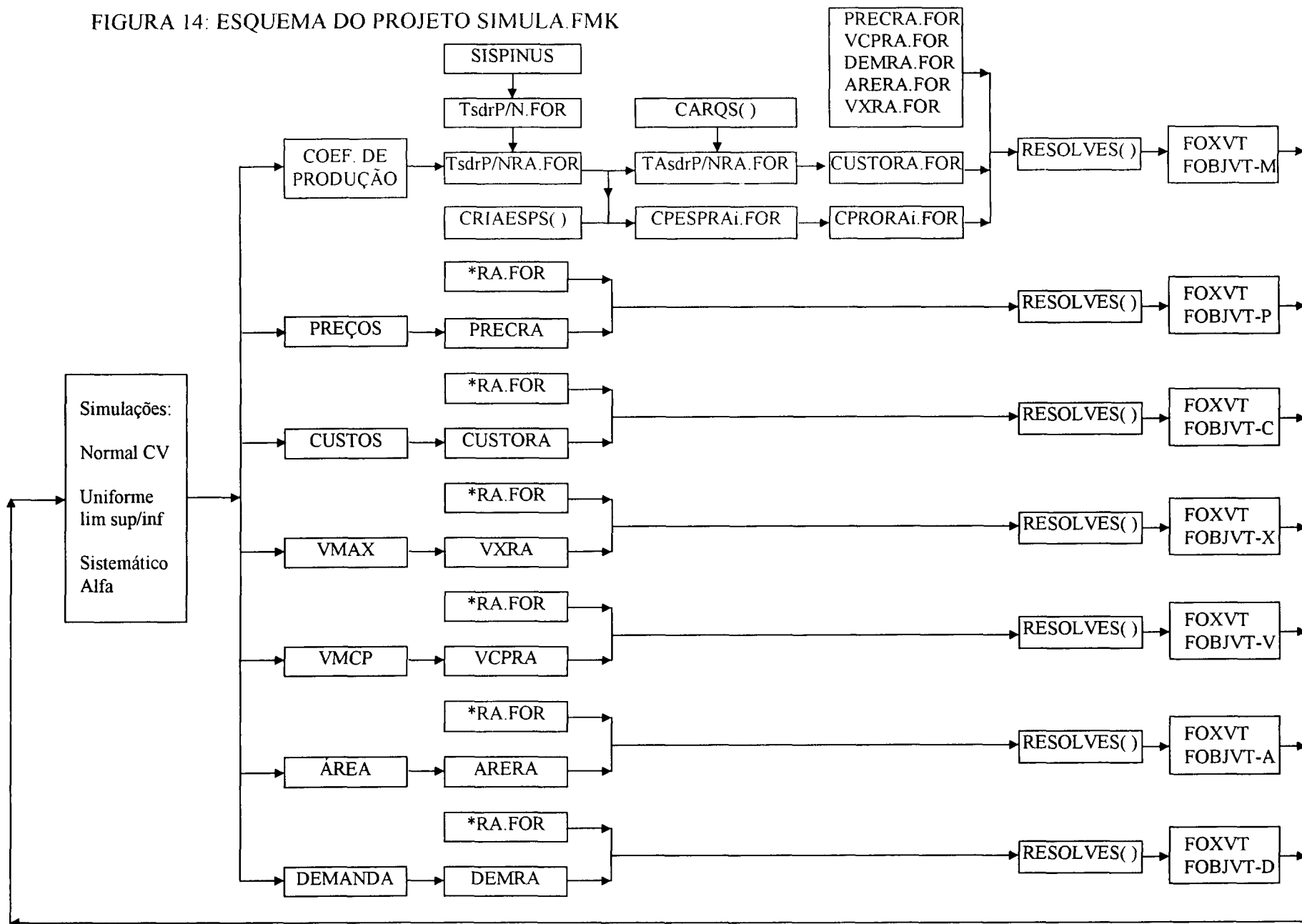
## 7º CASO) PERTURBANDO O ARQUIVO DE DEMANDAS

1. Inicia-se a execução do SIMULA.FOR, escolhendo a perturbação (normal, uniforme ou sistemática ).
2. Abre-se o arquivo original de demandas e perturbam-se as variáveis de demanda dos produtos . As variáveis perturbadas são gravadas no arquivo DEMRA.FOR.
3. Os demais arquivos devem ser iguais aos originais.
4. Chama-se a subrotina RESOLVES e executa-se o SIMPLEX.
5. Os resultados são jogados no arquivo FOXVT.FOR e FOXVT-D\*.FOR e o valor da Função Objetivo no arquivo FOBJVT-D.FOR .

O projeto está esquematizado no esquema da Figura 14.



FIGURA 14: ESQUEMA DO PROJETO SIMULA.FMK



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA NO MODELO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

#### 4.1.1 Análise do modelo quanto à escolha da Função Objetivo

Muitos critérios econômicos poderiam ter sido usados como objetivo no modelo de planejamento, como apresentados por BERGER (1985).

O critério escolhido, de maximização do Valor Líquido Presente Geral, considera o custo de oportunidade pelo uso do capital. Os valores das variáveis de decisão são obtidos em função dos custos de manejo, do valor terminal associado a cada estrato e regime, da taxa de crescimento volumétrico de cada região, dos preços dos produtos considerados, do atendimento das demandas e principalmente da própria taxa de juro utilizada.

A escolha de maximizar o Valor Líquido Presente da Receita é uma política muito usada pelas empresas, apesar da dificuldade de se encontrar a taxa de juro conveniente, para se descontar os fluxos de caixa para o início do planejamento. Segundo BERGER (1980), “... a maior restrição ou dificuldade na aplicação deste critério está voltada para a taxa de desconto a ser aplicada. O uso de taxas elevadas tende a reduzir o valor líquido presente inviabilizando a produção florestal, enquanto o emprego de taxas reduzidas podem propiciar resultados não condizentes com a realidade econômica” .

Neste trabalho foi adotada a taxa de juro de 6% ao ano, que é considerada uma taxa conservadora (mínima) de comparação de projetos, porém outras taxas de juros também são aconselháveis para as simulações.

Outras opções para a Função Objetivo seriam, minimizar custos ou maximizar a produção, porém estas escolhas não garantem máximo lucro, pois não consideram o compromisso entre a receita bruta  $R$  e os custos  $C$ , o que é atendido pela maximização do valor líquido da receita  $RL = R - C$ .

Outro motivo para se utilizar o valor presente foi devido ao fato de que o modelo de PL requer funções lineares; tanto a taxa interna de retorno  $TIR$  ou a relação Benefício - Custo  $B/C$  não podem ser expressas de forma linear.

Para obter a  $TIR$  é necessário resolver a equação em função do *juro*,  

$$\sum_{k=0}^{PP} \frac{R_k}{(1 + juro)^k} = \sum_{k=0}^{PP} \frac{C_k}{(1 + juro)^k}$$
, ou ainda, escolher o máximo *juro* sujeito à restrição anterior, de forma que o empreendimento seja rentável. A formulação da equação anterior não é linear em função do *juro*.

A relação Benefício-Custo dada por  $B/C = \sum_{k=0}^{PP} \frac{R_k}{(1 + juro)^k} / \sum_{k=0}^{PP} \frac{C_k}{(1 + juro)^k}$  também não pode ser expressa como função linear de  $x$ , pois as receitas e custos tem que ser multiplicadas pelas variáveis de decisão  $x$ , de forma que a Função Objetivo se torna uma razão entre funções lineares, o que não é permitido num modelo de Programação Linear.

A desvantagem de que na maximização, os valores presentes nos primeiros períodos são maiores que nos últimos períodos, em parte é reduzida pelas restrições de controle de volume explorado nos primeiros anos e também pelo uso do  $VET$ .

No cálculo do  $VLP$  não foi incluído o custo da terra, pois se supõe que não haverá vendas de terra, porém foi incorporado o cálculo do  $VET$  para complementar o fluxo de caixa em perpetuidade, conforme descrito na seção 3.4.7.

O uso do *VET* na Função Objetivo, representa uma ponderação no cálculo da receita líquida, de forma que os estratos de mesmo sítio e região possuem o mesmo *VET*. Este cálculo, que sem o uso do *VET* daria peso 1 para todas as parcelas da somatória, agora beneficia os melhores sítios e regiões, pois se forem agrupados os estratos com mesmas características de sítio e região, então o *VET* para cada grupo define uma ponderação da

forma 
$$\max [VET_1 \cdot \sum_{i=1}^{NE_1} \sum_{j=1}^{NR} VLP(R-C) + \dots + VET_{i_N} \cdot \sum_{i=1}^{NE_{i_N}} \sum_{j=1}^{NR} VLP(R-C) ]$$
, onde o *VET* é

tanto maior quanto melhor for o sítio.

Neste caso, os resultados são representativos não somente para o período de planejamento, mas para as sucessivas rotações implementadas em perpetuidade.

#### 4.1.2 Análise do modelo quanto ao horizonte de planejamento *PP*

Segundo o trabalho de RIBEIRO e GRAÇA (1996), para fornecer uma base justa de tempo para todos os regimes considerados, evitando que um regime tenha preferência sobre outro, pode-se ou usar  $PP = mmc$  { idades de rotação dos regimes considerados } ou usar perpetuidade de tempo através do uso do *VET*, onde *PP* representa o horizonte de planejamento e *mmc* o mínimo múltiplo comum.

O modelo de PL escolhe a melhor opção entre vários regimes para cada estrato, sendo que estes regimes possuem idades de rotação diferenciadas. Segundo o mesmo trabalho, “...recomenda-se a adoção do Valor Esperado do Solo como indicador econômico apropriado, pois ele permitirá a comparação de projetos com prazos distintos de maturação”, ou ainda para se fazer uma comparação válida entre opções de manejos com diferentes idades de rotação, deve-se usar esta base justa de tempo que significa manejar em perpetuidade.

Então para evitar que a amplitude do período de planejamento interfira nas decisões ótimas do PL:

1. Optou-se por um período de planejamento de 30 anos, pois o *Pinus* é tipicamente conduzido através de um ciclo de uma rotação de 20 ou 25 anos, seguindo-se a recomendação de WARE e CLUTTER (1971) de dimensionar o horizonte em uma vez e meia o ciclo típico da floresta.
2. Usou-se o *VET*, que considera o uso futuro da madeira após o término do período de planejamento.

#### 4.1.3 Análise do modelo quanto à escolha das restrições

As restrições de área são necessárias, pois definem o recurso existente. Estas restrições também possibilitam testar a necessidade de se adquirir uma nova área. Basta acrescentá-la no modelo e verificar o seu uso no planejamento. Porém, uma vez definida a estrutura de áreas disponíveis, o modelo não permite acrescentar áreas durante o planejamento.

As restrições de demandas que envolvem as produções/ha, além de informar o que pode ser produzido e o que é demandado, permitem a sobreposição de uso dos produtos considerados. Estas restrições informam que, se há sobra de madeira de um produto que possa ser usado para outro, ela deve ser utilizada, sendo que restrições comuns não conseguiriam identificar este fato, se as mesmas não informassem tal forma de uso.

O modelo possibilita a compra de madeira para processo nos períodos onde existe oferta do mercado, mesmo que haja produção própria. O modelo faz uma avaliação entre o custo de comprar o produto do mercado e o custo de manejar a própria área. Esta possibilidade é importante, pois empresas florestais normalmente estão acopladas a uma indústria de papel, sendo a madeira para processo o seu produto mais importante.

O modelo possibilita no final da execução, a factibilização do PL, através da compra de qualquer produto cuja demanda não possa ser atendida, informando os gargalos existentes na produção, ao longo de todo período de planejamento.

Outra vantagem do modelo é que a quantidade explorada nos primeiros  $P$  períodos pode ser limitada na quantidade necessária. Isto é útil quando a empresa possui muitas áreas plantadas prontas para o corte.

Todas as restrições que usam dados de produção, dependem de que esses dados sejam obtidos externamente, através de tabelas de produção. O ideal seria acoplar um simulador de produção que fornecesse o coeficiente de produção diretamente, depois de dadas as características de cada estrato usado no modelo.

#### 4.1.4 Análise quanto à resolução do modelo

Quanto à resolução do modelo, optou-se por usar o Simplex Revisado, o critério Partial-Pricing e o GUB, pois são técnicas já usadas por CARNIERI (1989) em seu trabalho de tese, com sucesso. O GUB tem a vantagem de propiciar o uso de um grande número de estratos sem alterar o tamanho da matriz básica do sistema.

A grande vantagem do modelo é de considerar muitas informações ao mesmo tempo e por um longo período, o que seria praticamente impossível com o uso de ferramentas usuais.

## 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO BÁSICO

### 4.2.1 Resultados

O modelo da seção 3.1.4 foi executado no programa RESOLVE.FOR para determinar a melhor opção de regime para cada estrato.

O arquivo completo com as soluções de todas as variáveis do PL, se encontra no Anexo 6.

Através do programa RESOLVE.FOR foram obtidos os valores de  $MI$  e  $PI$ , que representam os vetores multiplicadores do modelo.

O Valor Líquido Presente Geral encontrado foi de US\$ 49.667.472,20 sendo que a renda devido às demandas obrigatórias de processo foi de  $RDO = US\$ 6.195.177,30$ .

Na Tabela 50 estão representados os regimes escolhidos para cada estrato manejado, na Tabela 51, as vendas que ocorreram de todos os produtos em todos os períodos e na Tabela 52, as compras que ocorreram durante todo o horizonte planejado.

Pela observação da Tabela 50, conclui-se que o regime preferencial para a maioria dos estratos é o regime 6, com desbastes nas idades de 8 e 12 anos e corte raso aos 25 anos. Este regime, pelo fato de ter a rotação mais longa produz produtos nobres em maior quantidade, como os laminados, além de atender a demanda de madeira de processo em todos os períodos.

Outra consideração que pode ser feita é que o regime 6, foi o economicamente ótimo escolhido para a maior parte dos estratos.

Nem todas as áreas foram utilizadas durante o horizonte de planejamento considerado.

Do total de 12.716,4 ha, foram manejados 11.597,4 ha, sendo que 1.119,0 ha foram deixadas como estavam no início do planejamento. Todas as áreas podadas foram utilizadas, como esperado.

Do total manejado, o regime 6 foi escolhido para 10.330,6 ha, o regime 8 para 82,7 ha, o regime 9 para 9,0 ha, o regime 10 para 342,6 ha e o regime 11 para 832,5 ha.

Os estratos abandonados estão apresentados na Tabela 53.

O abandono está associado ao alto custo de manejo, a facilidade de compra e a própria rigidez dos regimes, sem muita opção de cortes em alguns períodos.

TABELA 50: VALORES DAS VARIÁVEIS DE MANEJO DO MODELO BÁSICO

Estrato	REGIMES DE MANEJO												Área (hectares)
	<i>Pulpwood</i>			<i>Regimes Utility</i>				<i>Regimes Clearwood</i>				<i>Abandono</i>	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	
1								82,7					82,7
2											118,0		118,0
3									9,0				9,0
4											235,4		234,4
5										319,8			319,8
6											60,7		60,7
7											48,2		48,2
8											47,0		47,0
9										22,8			22,8
10											323,2		323,2
11						42,8							42,8
12						10,2							10,2
13						67,0							67,0
14						107,7							107,7
15						73,8							73,8
16						73,8							73,8
17						161,0							161,0
18						164,7							164,7
19						138,5							138,5
20						397,7							397,7
21						287,0							287,0
22						249,0							249,0
23						36,5							36,5
24						115,4							115,4
25						12,6							12,6
26						72,1							72,1
27						171,3							171,3
28						32,6							32,6
29						12,5							12,5
30						32,9							32,9
31						89,6							89,6
32						392,2							392,2
33						198,9							198,9
34						55,1							55,1
35						227,8							227,8
36						419,6							419,6
37						175,3							175,3
38						142,6							142,6
39						289,4							289,4
40						443,6							443,6
41						67,1							67,1
42						32,1							32,1
43						38,9							38,9
44						20,7							20,7
45						68,1							68,1
46						75,6							75,6

continua...



TABELA 50: VALORES DAS VARIÁVEIS DE MANEJO DO MODELO BÁSICO

Estrato	REGIMES DE MANEJO												Área (hectares)
	<i>Pulpwood</i>			<i>Regimes Utility</i>				<i>Regimes Clearwood</i>				<i>Abandono</i>	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	
47						148,5							148,5
48						357,7							357,7
49						60,8							60,8
50						23,6							23,6
51						118,4							118,4
52						583,2							583,2
53						117,7							117,7
54						391,0							391,0
55						137,2							137,2
56						94,8							94,8
57						114,6							114,6
58						93,7							93,7
59						329,4							329,4
60						296,9							296,9
61						123,1							123,1
62						248,9							248,9
63						92,6							92,6
64						426,8							426,8
65						159,4							159,4
66												294,2	294,2
67						11,0							11,0
68												514,1	514,1
69												310,7	310,7
70						87,5							87,5
71						329,2							329,2
72						79,4							79,4
73						228,9							228,9
74						228,9							228,9
75						218,8							218,8
76						7,5							7,5
77						49,6							49,6
78						7,9							7,9
79						42,6							42,6
80						125,3							125,3
Soma	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10330,6	0,0	82,7	9,0	342,6	832,5	1119,0	12715,4

TABELA 51 : VALORES DAS VENDAS DOS PRODUTOS DO MODELO BÁSICO

Periodo	Serraria <i>p</i>	Laminado1 <i>p</i>	Laminado2 <i>p</i>	Laminado3 <i>p</i>	Serraria <i>sp</i>	Laminado1 <i>sp</i>	Laminado2 <i>sp</i>	Laminado3 <i>sp</i>	Processo
1	2861,4	322,5			30802,1	105916,3	120248,1	58808,4	
2					50253,7	164922,2	178417,4	81586,0	
3	1962,1				29891,6	91961,3	98563,6	33105,8	36484,0
4	6779,9	65,3			2243,9	7130,1	8799,8	4750,6	27844,6
5	13897,6	572,6			17066,0	15310,4	18397,8	9930,8	10610,9
6					45247,8	73806,1	81335,2	32239,7	
7					72771,0	96120,8	112480,9	52752,9	87838,9
8					55855,9	24658,5	24678,7	8060,7	80919,7
9					34830,1	68823,9	74036,1	33874,7	
10					5373,7	577,4			
11	4862,8	14323,6	16581,4	5590,5	29710,8	2583,2			34451,4
12	1625,6	2986,8	1181,0		29380,1	5443,5		0,2	5633,6
13	21074,8	56252,8	27982,5	3166,0	386,5			0,1	
14	481,5	1426,5	856,8	154,8	23907,1	5510,7			
15					32131,5	6536,3			986,0
16					17617,1	1706,0			
17	22545,2	68376,0	47644,8	12512,8	2031,9	531,3			
18	21935,3	61784,8	70087,4	22631,1	35727,3	92535,5	92629,1	24626,1	
19	7139,0	25842,0	29724,2	16307,6	70276,0	168737,6	164873,2	43152,5	
20					116764,8	292108,7	302658,0	82626,4	13104,3
21					107574,0	313120,4	329471,9	89921,5	
22	2861,4	322,5			44454,8	96580,0	98530,6	26840,8	
23					4418,8	14552,2	15688,5	7143,5	
24					54312,7	167799,9	178368,8	58408,5	
25	418,2	0,0			47405,1	154283,3	165940,6	71854,9	
26	9626,0	383,8			1,8				
27					30800,4	105916,4	120250,4	58808,7	
28					50250,3	164920,0	178417,0	81586,0	
29	1962,1				29893,5	91962,4	98563,8	33105,8	36487,6
30	6361,7	65,3			2244,5	7131,4	8800,8	4750,8	26129,8
<b>Total/prod.</b>	<b>126394,5</b>	<b>232724,5</b>	<b>194058,1</b>	<b>60362,8</b>	<b>1073624,7</b>	<b>2341185,6</b>	<b>2471150,3</b>	<b>897935,6</b>	<b>360490,8</b>
								<b>TOTAL m<sup>3</sup> =</b>	<b>7757926,7</b>

TABELA 52: VALORES DAS VARIÁVEIS DE COMPRA DE MADEIRA PARA PROCESSO DO MODELO BÁSICO

Período (ano)	Quantidade de madeira comprada em (m <sup>3</sup> )
1	27.806,06
2	6.499,12
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	2.080,89
7	0,00
8	0,00
9	31.291,39
10	38.082,22
11	0,00
12	0,00
13	59.432,57
14	36.062,68
15	0,00
16	5.305,14
17	50.414,37
18	18.353,49
19	14.157,70
20	0,00
21	5.482,00
22	28.880,54
23	72.467,20
24	43.041,09
25	45.998,36
26	54.588,10
27	33.107,93
28	6.494,74
29	0,00
30	0,00

TABELA 53: ESTRATOS ABANDONADOS NA EXECUÇÃO DO PLANEJAMENTO

Estrato	Área	Região	Índice sítio	Densidade plantio	Idade
66	294,2 ha	4	III	1666 árvores/ha	8
68	514,1 ha	4	IV	1666 árvores/ha	7
69	310,7 ha	4	II	1666 árvores/ha	8
Total	1.119,0 ha				

Todos os estratos abandonados pertencem a região 4, que é a mais distante do centro de operações, tem custo de manejo em geral maior que das outras regiões e baixa produtividade. Nesta faixa de idade, de 4 a 8 anos, a empresa tem muitos estratos disponíveis, como pode ser observado na Figura 09, da seção 3.4.

Durante os 30 períodos de planejamento, só não há necessidade de compra de madeira para processo, nos períodos 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 15, 20, 29 e 30, como pode-se ver na Tabela 52. Nos demais, ou a produção não atende a demanda ou ocorre que sendo o preço de compra de madeira para processo muito baixo (US\$6,00/m<sup>3</sup>) torna-se preferível comprar do que manejar os estratos existentes.

O volume de compra em cada período está dentro dos limites aceitáveis. Os períodos onde ocorre maior necessidade de compra são pela ordem o 23, 13, 26, 17 e 25. Pelo perfil da produção média analisada, realmente previa-se uma falta de madeira em alguns períodos devido à não regulação da floresta, com distribuição desequilibrada das idades dos estratos e aos regimes rígidos disponíveis, que não tem condições de fornecer uma produção regulada em tão pouco tempo. A empresa possui ou estratos muito novos ou muito velhos, com poucos ou nenhum, na faixa de 10-16 anos. Os períodos de maior compra coincidem com os onde ocorre baixa produção de madeira para processo, como pode ser observado na Figura 17, apresentado posteriormente na seção 4.2.2.

As vendas ocorreram em todos os períodos e de vários produtos, como se vê na Tabela 51. Além do mais, como a única demanda obrigatória é a de madeira para processo, tudo o que foi produzido dos outros produtos foi colocado à venda. A venda de madeira de processo também ocorreu nos períodos em que não houve compra do mesmo. Supõe-se que a produção sempre tenha mercado para venda.

Nos períodos onde houve compra de madeira para processo também houve venda de outros produtos. Como a madeira destinada à serraria e laminados tipo L1 e L2, podados ou não, pode ser utilizada no processo de fabricação de papel, o Simplex poderia ter sugerido o uso destas produções para atender a demanda de madeira para processo, porém não o fez. Neste caso foram comparadas as receitas advindas das vendas destes produtos e do custo que ocorreria na compra da madeira para processo. Através destes resultados, observa-se que vale mais a pena comprar a madeira para processo e disponibilizar o existente da floresta para outros produtos mais rentáveis.

As folgas de capacidade produtiva se referem às sobras de produção máxima e que podem ser usadas para os outros produtos com os quais competem. Em geral se referem às folgas de demandas de madeira para processo. Elas ocorreram apenas em algumas situações. As folgas da 4ª e 8ª restrição, de cada bloco de restrições de demanda de um período  $k$ , são usadas sequencialmente para 3ª e 7ª restrição, se sobrar para a 2ª e 6ª, se ainda houver sobra para a 1ª ou 5ª restrição. A folga da 9ª restrição é usada para qualquer outro produto. Não existe folga na 10ª restrição, pois esta restrição representa o balanço de produção no período  $k$  e como o problema é de maximizar, esta folga deve ser nula. A justificativa econômica de que as folgas quase não existem é de que não vale a pena deixar para outro produto menos nobre, se não existe demanda (a demanda obrigatória só é de processo), pois vale mais a pena vender o produto mais caro.

As variáveis artificiais que estão na base são todas nulas, com exceção da  $VA(257)=1$  m<sup>3</sup>, que poderia subentender que o problema é infactível. A equação de demanda de número 257 relativa ao produto 7, no período 26 não foi atendida de 1 m<sup>3</sup>, porém como a infactibilidade é pequena, de valor menor ou igual a 1, considerou-se o PL factível. O valor de

aceitação da infactibilidade deve ser analisado em cada situação. As outras variáveis artificiais que estão na base, com valor zero, referem-se quase sempre aos produtos podados.

Todas as variáveis  $FVMAX_k$  estão na base, significando que não se está usando toda a possibilidade de volume máximo de exploração permitido no ano  $k$ , para  $k = 1, 2, 3, 4$  e  $5$ .

Os vetores multiplicadores ou preços duais  $\pi = (MI, PI)$  associados a cada variável da base, obtidos na resolução do modelo, representam a solução do problema dual associado ao PL da seção 3.1.4.

O custo reduzido  $\hat{c}_{ij} = c_{ij} - \pi \cdot A_j$  é a quantidade pelo qual o coeficiente da Função Objetivo da variável escolhida deve mudar para poder entrar na solução ótima. Preços duais e custos reduzidos são conceitos contínuos, no sentido que sua interpretação é válida somente enquanto a base atual permanece ótima. Quanto maior é o valor de  $MI$ , maior o preço sombra daquela área. Os valores encontrados de  $MI$ , pela ordem de importância para os estratos e manejos do modelo básico, estão na Tabela 54. A interpretação para o valor de  $MI$  é de que, em caso de se ampliar os recursos deve-se investir em estratos do tipo considerados na ordem apresentada na tabela citada.

TABELA 54: VALORES DOS PREÇOS DUAIS -  $MI$

Estrato	Manejo	$MI$ (US\$/ha)	Região	$IS$	Idade	$VET$ (US\$/ha)
13	6	18.726,83	2	I	24	2294,04
14	6	18.726,83	2	I	24	2294,04
42	6	16.512,14	1	I	21	3334,76
11	6	16.171,61	2	I	22	2294,04
12	6	16.171,61	2	I	22	2294,04

Quanto maior o valor de  $MI$  maior o valor econômico do estrato considerado, isto é, para cada hectare a mais que houver destes estratos, a tendência de crescimento no valor da Função Objetivo é de um valor equivalente a  $MI$ . Por exemplo, se for comprado 1 hectare a mais, da região 2 com uma plantação de *Pinus* de 24 anos, sítio I e manejado de acordo com o regime 6, a Função Objetivo tem tendência de aumento de US\$ 18.726,83 para os próximos 30 anos. Os estratos antigos foram escolhidos, porque o  $VLP$ , valor líquido presente, beneficia os cortes ocorridos nos primeiros anos de planejamento, acrescentado o fato de que estes estratos têm  $VET$  alto.

Através dos valores de  $PI$ , obtidos na execução do programa RESOLVE.FOR, observa-se que as restrições de demandas tem os maiores preços duais. A variável artificial representa a limitação no sistema, através do não atendimento da demanda.

Como foi observado antes, a maior parte das variáveis artificiais que estão na base ótima, se referem aos produtos podados. Isto significa que, se a demanda de 1 m<sup>3</sup> de qualquer um destes produtos aumenta, a Função Objetivo cai de US\$10.000,00, que é o custo da variável artificial. Têm-se também variáveis artificiais em relação aos outros produtos, como o 7 e o 8, nos períodos 10, 11 e 26. Se a demanda destes produtos diminuir de 1 unidade a  $FO$  aumenta de US\$10.000,00.

Os preços duais referentes às 5 últimas restrições significam que:

- Se for permitido que o volume máximo cortado no período  $k$  aumente de 1 m<sup>3</sup>, então a  $FO$  deve aumentar do valor de  $PI$ ; os valores de  $PI$  são todos nulos, no modelo básico, pois as restrições não são proibitivas.

Os preços de oportunidade referentes às demandas significam que:

- Se for permitido que a demanda caia de  $1 \text{ m}^3$  a função deve aumentar de  $10^4$  para as variáveis artificiais que estão na base. Observe-se que as  $VA$ 's que estão na base são principalmente as relativas aos produtos podados.

Uma informação adicional que se obtém dos resultados é quanto à idade final dos estratos, após os 30 anos de planejamento. Através da análise comparativa das Figuras 15 e 16, observa-se que a floresta continua não regulada, com falta de estratos nas idades 3, 13 e 14 anos.

Conclui-se que manejar atendendo uma demanda constante, não é suficiente para regular a floresta, em pelo menos 30 anos, a menos que se ofereça uma gama maior de regimes com várias idades de cortes de forma que haja mais flexibilidade nas escolhas. O que se observa nos resultados é uma pequena melhora nas distribuições das idades intermediárias, entre 10 e 15 anos, em relação ao início do planejamento, onde não havia algum estrato.

#### 4.2.2 Análise dos resultados

Os resultados básicos foram apresentados na seção 4.2.1. A partir destes dados pode-se obter informações adicionais, tais como, produção por estrato ao longo dos 30 anos, produção de processo, produção global e de cada um dos produtos por período. Também podem-se alterar algumas condições iniciais, a partir dos resultados da primeira execução, para obter outras informações. Este é o tipo de análise que será feito nesta seção.

##### Produção por estrato:

Cada estrato produzirá alguns produtos em alguns períodos de planejamento, segundo o manejo escolhido.



FIGURA 15: DISTRIBUIÇÃO DAS IDADES DOS ESTRATOS NO INÍCIO DO PLANEJAMENTO

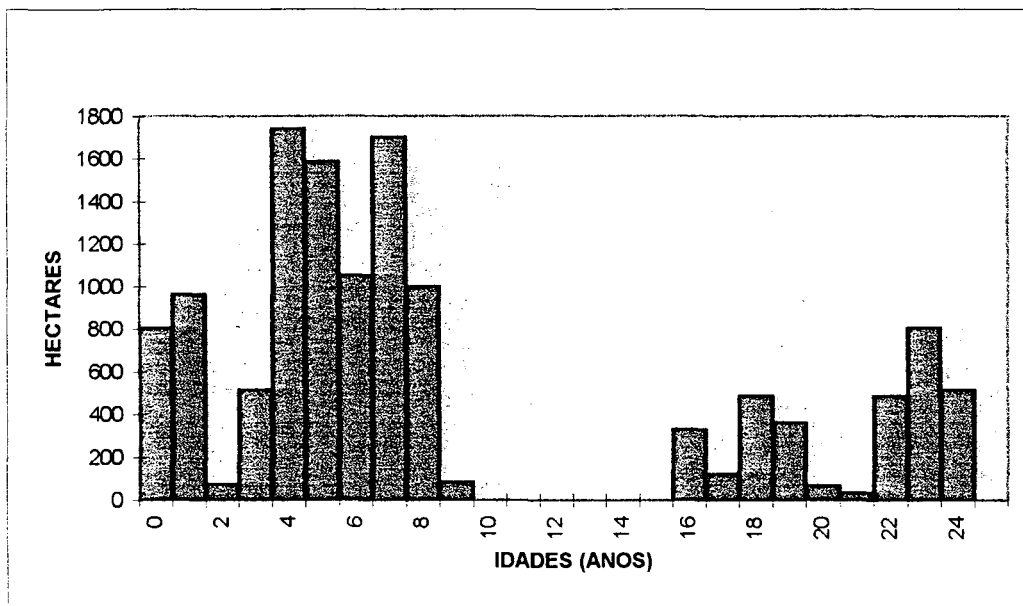
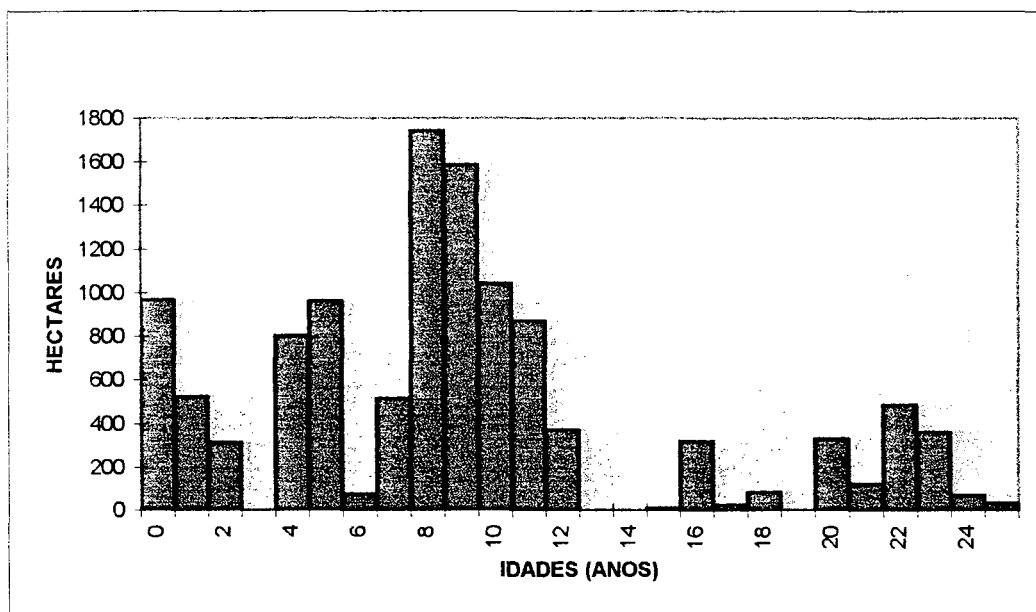


FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO DAS IDADES DOS ESTRATOS NO FINAL DO PLANEJAMENTO



Reunindo as informações da solução básica, sabem-se quais regimes de manejo atuam sobre cada estrato. Esses valores estão apresentados na Tabela 55.

Quando existe mais de um regime, examina-se a área destinada para cada um. Se a área destinada a um determinado manejo é pequena, optou-se por abandonar tal manejo e acrescentar tal área no outro manejo escolhido para o mesmo estrato

O manejo escolhido fornece os períodos de desbaste e corte raso. Abrem-se tabelas de produção convenientes, e tomam-se os valores de produção de cada produto/hectare. A multiplicação da área do estrato pelo coeficiente de produção fornece a produção do produto para cada estrato, em cada período onde existe corte.

#### Produção por período:

Classificando as produções por estrato em períodos de planejamento, têm-se as produções de madeira para processo e a produção total, por período de planejamento, como apresentado na Tabela 56.

Pela observação dos valores da Tabela 56 vê-se que no modelo se usa apenas a produção específica de processo para atender a demanda de processo e compra-se o restante no mercado, apesar de haver produção para atendê-la em quase todos os períodos, com exceção nos períodos 10, 14, 23 e 26. Mesmo havendo necessidade de madeira para processo, não se usa a produção dos outros produtos com os quais ele é compatível, pois através desses outros, a receita aumenta, devido ao maior preço de venda.

Observa-se também que, quando a produção específica de madeira para processo está acima da demanda da própria madeira, não existe compra no mercado.

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

PRODUÇÃO POR ESTRATO EM CADA PERÍODO DE PLANEJAMENTO, PARA  
MADEIRA PARA PROCESSO E PRODUÇÃO TOTAL:

PRODUÇÃO POR ESTRATO		PRODUÇÃO/ha		PRODUÇÃO EM m <sup>3</sup>		
Informações do estrato	Período de Planejamento	Processo (m <sup>3</sup> /ha)	Total (m <sup>3</sup> /ha)	Processo (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )	
ESTRATO	1	1	64,1	102,6	5301,1	8485,0
Área	82,7	11	35,1	535,2	2902,8	44261,0
Idade	9	22	64,1	102,6	5301,1	8485,0
Regime	8					
ESTRATO	2	5	64,9	102,7	7658,2	12118,6
Área	118,0	19	40,5	710,1	4779,0	83791,8
Idade	6					
Regime	11					
ESTRATO	3	4	53,0	60,2	477,0	541,8
Área	9,0	14	37,6	362,0	338,4	3258,0
Idade	6	25	53,0	60,2	477,0	541,8
Regime	8					
ESTRATO	4	4	57,1	77,3	13441,3	18196,4
Área	235,4	18	37,1	572,1	8733,3	134672,3
Idade	7	30	57,1	77,3	13441,3	18196,4
Regime	11					
ESTRATO	5	5	63,8	95,1	20403,2	30413,0
Área	319,8	13	39,5	378,7	12632,1	121108,3
Idade	7	26	63,8	95,1	20403,2	30413,0
Regime	10					
ESTRATO	6	4	61,0	83,7	3702,7	5080,6
Área	60,7	18	35,4	548,3	2148,8	33281,8
Idade	7	30	61,0	83,7	3702,7	5080,6
Regime	11					
ESTRATO	7	4	53,5	59,6	2578,7	2872,7
Área	48,2	18	38,2	440,0	1841,2	21208,0
Idade	7	30	53,5	59,6	2578,7	2872,7
Regime	11					
ESTRATO	8	3	50,5	55,8	2373,5	2622,6
Área	47,0	17	39,1	447,2	1837,7	21018,4
Idade	8	29	50,5	55,8	2373,5	2622,6
Regime	11					
ESTRATO	9	4	54,3	55,8	1238,0	1272,2
Área	22,8	12	37,4	447,2	852,7	10196,2
Idade	8	25	54,3	55,8	1238,0	1272,2
Regime	10					
ESTRATO	10	3	50,5	55,8	16321,6	18034,6
Área	323,2	17	39,1	447,2	12637,1	144535,0
Idade	8	29	50,5	55,8	16321,6	18034,6
Regime	11					
ESTRATO	11	3	36,1	707,5	1545,1	30281,0
Área	42,8	12	67,6	78,8	2893,3	3372,6
Idade	22	16	60,8	134,7	2602,2	5765,2
Regime	6	29	36,1	707,5	1545,1	30281,0
ESTRATO	12	3	36,1	707,5	368,2	7216,5
Área	10,2	12	67,6	78,8	689,5	803,8
Idade	22	16	60,8	134,7	620,2	1373,9
Regime	6	29	36,1	707,5	368,2	7216,5

continua...

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

Informações do estrato	Período de Planejamento	Processo (m <sup>3</sup> /ha)	Total (m <sup>3</sup> /ha)	Processo (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )	
ESTRATO	13	1	36,1	707,5	2418,7	47402,5
Área	67,0	10	67,6	78,8	4529,2	5279,6
Idade	24	14	60,8	134,7	4073,6	9024,9
Regime	6	27	36,1	707,5	2418,7	47402,5
ESTRATO	14	1	36,1	707,5	3888,0	76197,8
Área	107,7	10	67,6	78,8	7280,5	8486,8
Idade	24	14	60,8	134,7	6548,2	14507,2
Regime	6	27	36,1	707,5	3888,0	76197,8
ESTRATO	15	6	59,2	61,1	4369,0	4509,2
Área	73,8	10	63,3	108,4	4671,5	7999,9
Idade	2	23	34,3	600,8	2531,3	44339,0
Regime	6					
ESTRATO	16	3	34,3	600,8	2531,3	44339,0
Área	73,8	12	59,2	61,1	4369,0	4509,2
Idade	22	16	63,3	108,4	4671,5	7999,9
Regime	6	29	34,3	600,8	2531,3	44339,0
ESTRATO	17	2	34,3	600,8	5522,3	96728,8
Área	161,0	11	59,2	61,1	9531,2	9837,1
Idade	23	15	63,3	108,4	10191,3	17452,4
Regime	6	28	34,3	600,8	5522,3	96728,8
ESTRATO	18	2	34,3	600,8	5649,2	98951,8
Área	164,7	11	59,2	61,1	9750,2	10063,2
Idade	23	15	63,3	108,4	10425,5	17853,5
Regime	6	28	34,3	600,8	5649,2	98951,8
ESTRATO	19	1	34,3	600,8	4750,6	83210,8
Área	138,5	10	59,2	61,1	8199,2	8462,4
Idade	24	14	63,3	108,4	8767,1	15013,4
Regime	6	27	34,3	600,8	4750,6	83210,8
ESTRATO	20	8	59,2	61,1	23543,8	24299,5
Área	397,7	12	63,3	108,4	25174,4	43110,7
Idade	0	25	34,3	600,8	13641,1	238938,2
Regime	6					
ESTRATO	21	8	59,2	61,1	16990,4	17535,7
Área	287,0	12	63,3	108,4	18167,1	31110,8
Idade	0	25	34,3	600,8	9844,1	172429,6
Regime	6					
ESTRATO	22	7	59,2	61,1	14740,8	15213,9
Área	249,0	11	63,3	108,4	15761,7	26991,6
Idade	1	24	34,3	600,8	8540,7	149599,2
Regime	6					
ESTRATO	23	7	36,7	699,7	1339,6	25539,1
Área	36,5	16	88,8	100,2	3241,2	3657,3
Idade	18	20	63,5	137,7	2317,8	5026,1
Regime	6					
ESTRATO	24	7	36,7	699,7	4235,2	80745,4
Área	115,4	16	88,8	100,2	10247,5	11563,1
Idade	18	20	63,5	137,7	7327,9	15890,6
Regime	6					
ESTRATO	25	7	34,9	597,3	439,7	7526,0
Área	12,6	16	77,5	78,7	976,5	991,6
Idade	18	20	65,3	110,2	822,8	1388,5
Regime	6					

continua...

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

Informações do estrato	Período de Planejamento	Processo (m3/ha)	Total (m3/ha)	Processo (m3)	Total (m3)	
ESTRATO	26	7	34,9	597,3	2516,3	43065,3
Área	72,1	16	77,5	78,7	5587,8	5674,3
Idade	18	20	65,3	110,2	4708,1	7945,4
Regime	6					
ESTRATO	27	7	34,9	597,3	5978,4	102317,5
Área	171,3	16	77,5	78,7	13275,8	13481,3
Idade	18	20	65,3	110,2	11185,9	18877,3
Regime	6					
ESTRATO	28	7	34,9	597,3	1137,7	19472,0
Área	32,6	16	77,5	78,7	2526,5	2565,6
Idade	18	20	65,3	110,2	2128,8	3592,5
Regime	6					
ESTRATO	29	7	34,9	597,3	436,3	7466,3
Área	12,5	16	77,5	78,7	968,8	983,8
Idade	18	20	65,3	110,2	816,3	1377,5
Regime	6					
ESTRATO	30	7	34,9	597,3	1148,2	19651,2
Área	32,9	16	77,5	78,7	2549,8	2589,2
Idade	18	20	65,3	110,2	2148,4	3625,6
Regime	6					
ESTRATO	31	2	36,3	750,9	3252,5	67280,6
Área	89,6	11	61,5	81,7	5510,4	7320,3
Idade	23	15	65,7	140,8	5886,7	12615,7
Regime	6	28	36,3	750,9	3252,5	67280,6
ESTRATO	32	2	36,3	639,3	14236,9	250733,5
Área	392,2	11	61,5	63,5	24120,3	24904,7
Idade	23	15	65,7	113,2	25767,5	44397,0
Regime	6	28	36,3	639,3	14236,9	250733,5
ESTRATO	33	1	36,3	639,3	7220,1	127156,8
Área	198,9	10	61,5	63,5	12232,4	12630,2
Idade	24	14	65,7	113,2	13067,7	22515,5
Regime	6	27	36,3	639,3	7220,1	127156,8
ESTRATO	34	5	46,8	47,0	2578,7	2589,7
Área	55,1	9	61,8	90,2	3405,2	4970,0
Idade	3	22	36,4	530,2	2005,6	29214,0
Regime	6					
ESTRATO	35	4	46,8	47,0	10661,0	10706,6
Área	227,8	8	61,8	90,2	14078,0	20547,6
Idade	4	21	36,4	530,2	8291,9	120779,6
Regime	6	30	46,8	47,0	10661,0	10706,6
ESTRATO	36	4	46,8	47,0	19637,3	19721,2
Área	419,6	8	61,8	90,2	25931,3	37847,9
Idade	4	21	36,4	530,2	15273,4	222471,9
Regime	6	30	46,8	47,0	19637,3	19721,2
ESTRATO	37	4	46,8	47,0	8204,0	8239,1
Área	175,3	8	61,8	90,2	10833,5	15812,1
Idade	4	21	36,4	530,2	6380,9	92944,1
Regime	6	30	46,8	47,0	8204,0	8239,1
ESTRATO	38	4	46,8	47,0	6673,7	6702,2
Área	142,6	8	61,8	90,2	8812,7	12862,5
Idade	4	21	36,4	530,2	5190,6	75606,5
Regime	6	30	46,8	47,0	6673,7	6702,2

continua...

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

Informações do estrato		Período de Planejamento	Processo (m3/ha)	Total (m3/ha)	Processo (m3)	Total (m3)
ESTRATO	39	3	46,8	47,0	13543,9	13601,8
Área	289,4	7	61,8	90,2	17884,9	26103,9
Idade	5	20	36,4	530,2	10534,2	153439,9
Regime	6	29	46,8	47,0	13543,9	13601,8
ESTRATO	40	3	46,8	47,0	20760,5	20849,2
Área	443,6	7	61,8	90,2	27414,5	40012,7
Idade	5	20	36,4	530,2	16147,0	235196,7
Regime	6	29	46,8	47,0	20760,5	20849,2
ESTRATO	41	5	38,8	742,3	2603,5	49808,3
Área	67,1	14	91,5	103,6	6139,7	6951,6
Idade	20	18	65,8	143,8	4415,2	9649,0
Regime	6					
ESTRATO	42	4	38,8	742,3	1245,5	23827,8
Área	32,1	13	91,5	103,6	2937,2	3325,6
Idade	21	17	65,8	143,8	2112,2	4616,0
Regime	6	30	38,8	742,3	1245,5	23827,8
ESTRATO	43	8	37,0	635,3	1439,3	24713,2
Área	38,9	17	80,4	81,7	3127,6	3178,1
Idade	17	21	67,8	115,2	2637,4	4481,3
Regime	6					
ESTRATO	44	6	37,0	635,3	765,9	13150,7
Área	20,7	15	80,4	81,7	1664,3	1691,2
Idade	19	19	67,8	115,2	1403,5	2384,6
Regime	6					
ESTRATO	45	6	37,0	635,3	2519,7	43263,9
Área	68,1	15	80,4	81,7	5475,2	5563,8
Idade	19	19	67,8	115,2	4617,2	7845,1
Regime	6					
ESTRATO	46	8	37,5	528,9	2835,0	39984,8
Área	75,6	17	60,6	60,7	4581,4	4588,9
Idade	17	21	62,7	90,5	4740,1	6841,8
Regime	6					
ESTRATO	47	6	37,5	528,9	5568,8	78541,7
Área	148,5	15	60,6	60,7	8999,1	9014,0
Idade	19	19	62,7	90,5	9311,0	13439,3
Regime	6					
ESTRATO	48	3	37,5	528,9	13413,8	189187,5
Área	357,7	12	60,6	60,7	21676,6	21712,4
Idade	22	16	62,7	90,5	22427,8	32371,9
Regime	6	29	37,5	528,9	13413,8	189187,5
ESTRATO	49	1	44,8	44,8	2723,8	2723,8
Área	60,8	5	54,5	68,2	3313,6	4146,6
Idade	7	18	36,0	427,2	2188,8	25973,8
Regime	6	27	44,8	44,8	2723,8	2723,8
ESTRATO	50	6	36,0	427,2	849,6	10081,9
Área	23,6	15	44,8	44,8	1057,3	1057,3
Idade	19	19	54,5	68,2	1286,2	1609,5
Regime	6					
ESTRATO	51	8	45,6	45,8	5399,0	5422,7
Área	118,4	12	57,6	84,5	6819,8	10004,8
Idade	0	25	32,1	468,0	3800,6	55411,2
Regime	6					

continua...

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

Informações do estrato	Período de Planejamento	Processo (m3/ha)	Total (m3/ha)	Processo (m3)	Total (m3)	
ESTRATO	52	7	45,6	45,8	26593,9	26710,6
Área	583,2	11	57,6	84,5	33592,3	49280,4
Idade	1	24	32,1	468,0	18720,7	272937,6
Regime	6					
ESTRATO	53	5	45,6	45,8	5367,1	5390,7
Área	117,7	9	57,6	84,5	6779,5	9945,7
Idade	3	22	32,1	468,0	3778,2	55083,6
Regime	6					
ESTRATO	54	4	45,6	45,8	17829,6	17907,8
Área	391,0	8	57,6	84,5	22521,6	33039,5
Idade	4	21	32,1	468,0	12551,1	182988,0
Regime	6	30	45,6	45,8	17829,6	17907,8
ESTRATO	55	4	45,6	45,8	6256,3	6283,8
Área	137,2	8	57,6	84,5	7902,7	11593,4
Idade	4	21	32,1	468,0	4404,1	64209,6
Regime	6	30	45,6	45,8	6256,3	6283,8
ESTRATO	56	3	45,6	45,8	4322,9	4341,8
Área	94,8	7	57,6	84,5	5460,5	8010,6
Idade	5	20	32,1	468,0	3043,1	44366,4
Regime	6	29	45,6	45,8	4322,9	4341,8
ESTRATO	57	3	45,6	45,8	5225,8	5248,7
Área	114,6	7	57,6	84,5	6601,0	9683,7
Idade	5	20	32,1	468,0	3678,7	53632,8
Regime	6	29	45,6	45,8	5225,8	5248,7
ESTRATO	58	3	45,6	45,8	4272,7	4291,5
Área	93,7	7	57,6	84,5	5397,1	7917,7
Idade	5	20	32,1	468,0	3007,8	43851,6
Regime	6	29	45,6	45,8	4272,7	4291,5
ESTRATO	59	2	45,6	45,8	15020,6	15086,5
Área	329,4	6	57,6	84,5	18973,4	27834,3
Idade	6	19	32,1	468,0	10573,7	154159,2
Regime	6	28	45,6	45,8	15020,6	15086,5
ESTRATO	60	1	45,6	45,8	13538,6	13598,0
Área	296,9	5	57,6	84,5	17101,4	25088,1
Idade	7	18	32,1	468,0	9530,5	138949,2
Regime	6	27	45,6	45,8	13538,6	13598,0
ESTRATO	61	5	43,8	44,0	5391,8	5416,4
Área	123,1	9	61,7	88,9	7595,3	10943,6
Idade	3	22	38,6	557,4	4751,7	68615,9
Regime	6					
ESTRATO	62	4	43,8	44,0	10901,8	10951,6
Área	248,9	8	61,7	88,9	15357,1	22127,2
Idade	4	21	38,6	557,4	9607,5	138736,9
Regime	6	30	43,8	44,0	10901,8	10951,6
ESTRATO	63	3	43,8	44,0	4055,9	4074,4
Área	92,6	7	61,7	88,9	5713,4	8232,1
Idade	5	20	38,6	557,4	3574,4	51615,2
Regime	6	29	43,8	44,0	4055,9	4074,4
ESTRATO	64	2	43,8	44,0	18693,8	18779,2
Área	426,8	6	61,7	88,9	26333,6	37942,5
Idade	6	19	38,6	557,4	16474,5	237898,3
Regime	6	28	43,8	44,0	18693,8	18779,2

continua...

TABELA 55: PRODUÇÃO POR ESTRATO

Informações do estrato	Período de Planejamento	Processo (m3/ha)	Total (m3/ha)	Processo (m3)	Total (m3)	
ESTRATO	65	1	43,8	44,0	6981,7	7013,6
Área	159,4	5	61,7	88,9	9835,0	14170,7
Idade	7	18	38,6	557,4	6152,8	88849,6
Regime	6	27	43,8	44,0	6981,7	7013,6
ESTRATO	67	6	38,6	557,4	424,6	6131,4
Área	11,0	15	43,8	44,0	481,8	484,0
Idade	19	19	61,7	88,9	678,7	977,9
Regime	6					
ESTRATO	70	6	42,3	826,3	3701,3	72301,3
Área	87,5	15	69,1	80,2	6046,3	7017,5
Idade	19	19	66,1	144,6	5783,8	12652,5
Regime	6					
ESTRATO	71	9	36,1	634,7	11884,1	208943,2
Área	329,2	18	64,9	67,0	21365,1	22056,4
Idade	16	22	67,8	116,8	22319,8	38450,6
Regime	6					
ESTRATO	72	7	49,7	50,0	3946,2	3970,0
Área	79,4	11	64,2	93,6	5097,5	7431,8
Idade	1	24	36,4	529,6	2890,2	42050,2
Regime	6					
ESTRATO	73	3	49,7	50,0	11376,3	11445,0
Área	228,9	7	64,2	93,6	14695,4	21425,0
Idade	5	20	36,4	529,6	8332,0	121225,4
Regime	6	29	49,7	50,0	11376,3	11445,0
ESTRATO	74	3	49,7	50,0	11376,3	11445,0
Área	228,9	7	64,2	93,6	14695,4	21425,0
Idade	5	20	36,4	529,6	8332,0	121225,4
Regime	6	29	49,7	50,0	11376,3	11445,0
ESTRATO	75	5	49,7	50,0	10874,4	10940,0
Área	218,8	9	64,2	93,6	14047,0	20479,7
Idade	3	22	36,4	529,6	7964,3	115876,5
Regime	6					
ESTRATO	76	1	49,7	50,0	372,8	375,0
Área	7,5	5	64,2	93,6	481,5	702,0
Idade	7	18	36,4	529,6	273,0	3972,0
Regime	6	27	49,7	50,0	372,8	375,0
ESTRATO	77	7	49,7	50,0	2465,1	2480,0
Área	49,6	11	64,2	93,6	3184,3	4642,6
Idade	1	24	36,4	529,6	1805,4	26268,2
Regime	6					
ESTRATO	78	8	35,3	429,6	278,9	3393,8
Área	7,9	17	36,5	36,5	288,4	288,4
Idade	17	21	56,1	70,3	443,2	555,4
Regime	6					
ESTRATO	79	2	36,5	36,5	1554,9	1554,9
Área	42,6	6	56,1	70,3	2389,9	2994,8
Idade	6	19	35,3	429,6	1503,8	18301,0
Regime	6	28	36,5	36,5	1554,9	1554,9
ESTRATO	80	2	36,5	36,5	4573,5	4573,5
Área	125,3	6	56,1	70,3	7029,3	8808,6
Idade	6	19	35,3	429,6	4423,1	53828,9
Regime	6	28	36,5	36,5	4573,5	4573,5



TABELA 56: PRODUÇÃO DE MADEIRA PARA PROCESSO, TOTAL, COMPRAS E VENDAS POR PERÍODO

Período de planejamento	Somatório processo (m3/ha)	Somatório total (m3/ha)	Processo P (m3)	Demanda D (m3)	Excesso/falta F (m3)	Total T (m3)	CMP = falta (m3)	Vendas=T-P (m3)
1	390,8	2942,3	47195,3	75000,0	-27804,7	366163,3	27806,1	318968,0
2	303,6	2754,6	68503,7	75000,0	-6496,3	553688,7	6499,1	485185,1
3	618,6	3031,7	111487,8	75000,0	36487,8	366978,6	0,0	255490,8
4	639,9	1402,5	102847,0	75000,0	27847,0	132303,9	0,0	29456,8
5	591,4	1462,1	85608,4	75000,0	10608,4	160783,9	0,0	75175,6
6	519,1	3985,5	72925,0	75000,0	-2075,1	305560,2	2080,9	232635,3
7	973,5	5900,1	162839,5	75000,0	87839,5	496967,9	0,0	334128,4
8	697,9	2380,5	155923,4	75000,0	80923,4	269179,9	0,0	113256,5
9	281,4	991,9	43711,1	75000,0	-31289,0	255282,2	31291,4	211571,1
10	319,2	390,6	36912,8	75000,0	-38087,2	42858,8	38082,2	5946,0
11	525,8	1182,7	109450,7	75000,0	34450,7	184732,7	0,0	75282,0
12	476,6	1027,9	80642,5	75000,0	5642,5	124820,4	0,0	44178,0
13	131,0	482,3	15569,3	75000,0	-59430,8	124433,8	59432,6	108864,6
14	379,7	956,6	38934,6	75000,0	-36065,4	71270,5	36062,7	32335,9
15	637,1	863,9	75995,0	75000,0	995,0	117146,3	0,0	41151,3
16	890,2	1140,9	69695,5	75000,0	-5304,6	89017,1	5305,1	19321,6
17	321,5	1217,1	24584,3	75000,0	-50415,7	178224,8	50414,4	153640,6
18	384,5	3753,4	56648,8	75000,0	-18351,3	478612,1	18353,5	421963,3
19	562,4	3217,3	60834,3	75000,0	-14165,7	586888,1	14157,7	526053,8
20	799,3	5017,6	88104,8	75000,0	13104,8	882277,0	0,0	794172,1
21	435,0	3332,8	69520,4	75000,0	-5479,6	909615,0	5482,0	840094,6
22	275,4	2304,6	46120,6	75000,0	-28879,4	315725,6	28880,5	269605,0
23	34,3	600,8	2531,3	75000,0	-72468,7	44339,0	72467,2	41807,7
24	139,2	2128,0	31957,0	75000,0	-43043,0	490855,2	43041,1	458898,2
25	208,0	1785,6	29000,9	75000,0	-45999,1	468593,0	45998,4	439592,1
26	63,8	95,1	20403,2	75000,0	-54596,8	30413,0	54588,1	10009,7
27	326,7	2839,7	41894,2	75000,0	-33105,8	357678,3	33107,9	315784,0
28	303,6	2754,6	68503,7	75000,0	-6496,3	553688,7	6494,7	485185,1
29	618,6	3031,7	111487,8	75000,0	36487,8	366978,6	0,0	255490,8
30	532,6	1242,5	101132,0	75000,0	26132,0	130489,8	0,0	29357,8
SOMA =	13380,7	64216,9	2030964,9	2250000,0	-219035,2	9455566,4	579545,6	7424601,5

Nas Figuras 17 e 18 observam-se, respectivamente, as produções específicas de processo e a produção global, comparado com a demanda constante de madeira para processo de 75.000 m<sup>3</sup>, ao longo dos 30 anos.

Nos períodos 10, 14, 23 e 26 mesmo que toda produção fosse usada para processo não se conseguiria atender a demanda de 75000 m<sup>3</sup>/ano.

Nos demais anos seria possível atender esta demanda, porém mostrou-se mais vantajoso comprar madeira para processo e manejar os estratos de forma a obter produtos mais nobres, melhorando desta forma a receita a ser maximizada. A escolha preferencial, quase exclusiva, do regime 6 ( 8-12-25 ) vem provar esta afirmação, pois este regime é um dos que produzem produtos mais nobres.

Na Tabela 56, o volume total de vendas é obtido pela diferença entre o total produzido  $T$  (7ª coluna) e o produzido para processo  $P$  (4ª coluna da tabela).

A coluna de excesso ou falta  $F$  é obtida pela diferença entre o produzido de processo  $P$  (4ª coluna) e a demanda constante  $D$  de 75.000 m<sup>3</sup> ( 5ª coluna).

A compra de madeira para processo  $CMP$  coincide com o valor de falta apresentado na coluna de excesso/falta (6ª coluna). No caso de excesso não há compra de madeira.

#### 4.2.3 Comparação entre resultados usando o valor terminal $VT$ na função objetivo e sem usar o $VT$

O modelo apresentado na seção 3.1.4 também foi executado sem o uso do valor terminal  $VT_{ij}$  associado a cada estrato  $i$  e regime  $j$ , conforme definido em 3.4.7.3.

Basicamente não houve diferença nas decisões de manejo; apenas uma variável de decisão de manejo entre 80 estratos foi alterada, conforme os resultados apresentados na Tabela 57.

FIGURA 17: PRODUÇÃO DE MADEIRA PARA PROCESSO, ESTIMADO PELO MODELO DE PLANEJAMENTO

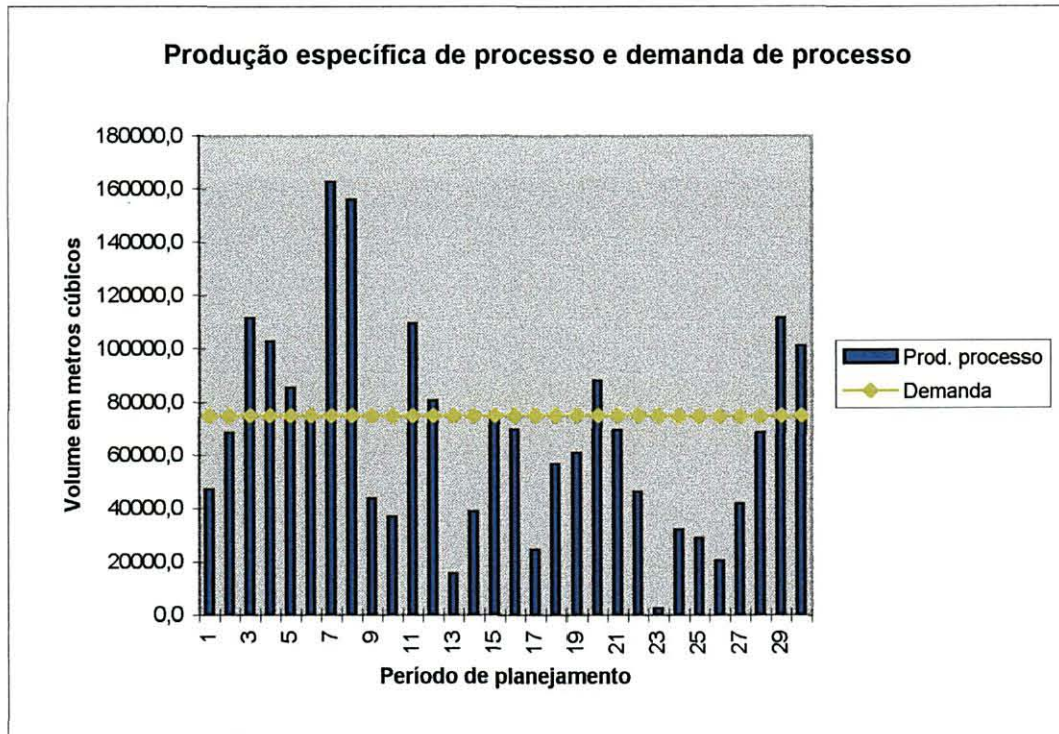
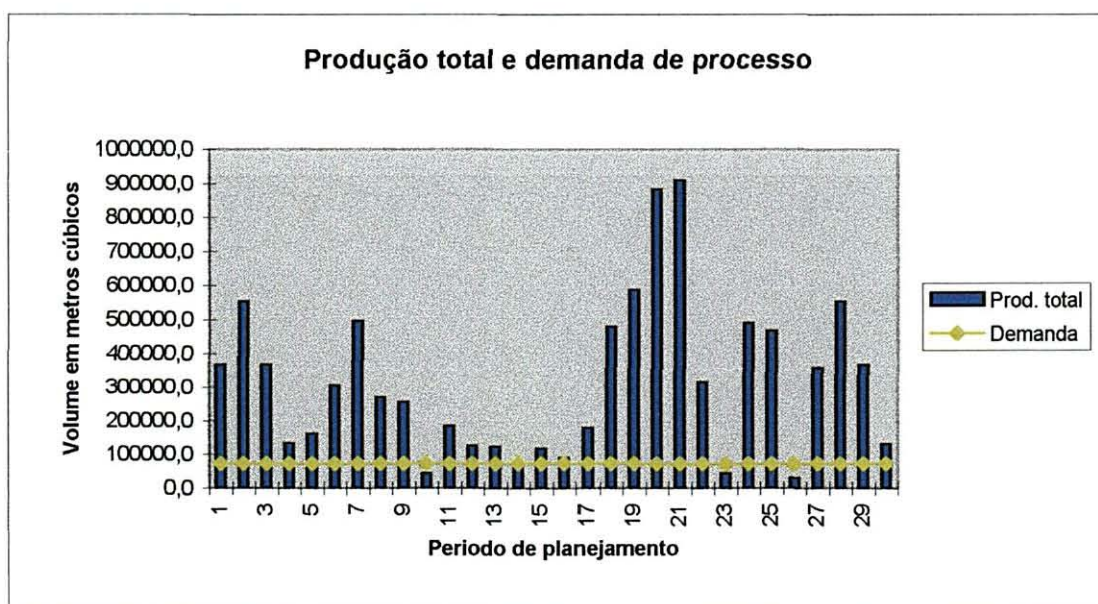


FIGURA 18: PRODUÇÃO TOTAL DE MADEIRA ESTIMADO PELO MODELO DE PLANEJAMENTO



O valor da Função Objetivo com o uso do *VET* aumentou, já que foram consideradas as receitas líquidas provenientes da continuidade dos manejos em perpetuidade, após o término do período de planejamento.

TABELA 57: RESULTADOS DO MODELO BÁSICO SEM *VET* E COM *VET*

	Modelo sem <i>VET</i>	Modelo com <i>VET</i>
Área manejada (ha)	11.348,50	11.597,41
Área abandonada (ha)	1.367,90	1.118,99
Compra de madeira processo (m <sup>3</sup> )	589.138,00	579.545,00
Vendas (m <sup>3</sup> )	7.584.825,00	7.757.926,00
Função Objetivo (US\$)	42.109.139,00	49.667.472,20
Diferença observada nos manejos	estrato 62 abandonado	estrato 62 escolhe regime 6

Com o uso do *VET* na formulação, foram escolhidos nas atividades mais 248,90 ha, do estrato 62, havendo redução na compra de madeira para processo *CMP* e aumento de vendas, justamente nos períodos em que este estrato contribuiu com seus desbastes, isto é, nos períodos 4, 8, 21 e 30. Neste caso foi preferível deixar de comprar nestes períodos e manejar este estrato, se comparados os custos das duas situações, em perpetuidade, além dos produtos que ficam disponíveis para a venda.

Apesar de, teoricamente, o uso do *VET* ser um critério mais completo, na prática e em particular neste estudo de caso, não provocou grandes variações nas decisões.

Uma outra justificativa para o fato de ter alterado apenas uma variável de decisão é que na 1ª execução sem *VET*, a escolha já tinha sido feita pelos regimes economicamente ótimos (REO) na maioria dos casos; e como o *VET* está associado a estes regimes, sua inclusão só confirmou as decisões anteriores, isto é, o modelo de PL procurou o REO, quando possível. Na ausência destas considerações, possivelmente a diferença poderia ter sido maior.

### 4.3 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NO MODELO BÁSICO

#### 4.3.1 Análise das simulações estocásticas e cenários dos dados de produção

##### 4.3.1.1 Simulações normais

Cada coeficiente de produção  $a_{ij}^{lk}$  foi perturbado por um ruído com uma distribuição normal, para diferentes coeficientes de variação  $CV$ . A perturbação, da forma como foi feita, ocorre proporcional ao valor absoluto do coeficiente ; se  $a_{ij}^{lk}$  é grande, a perturbação será maior em termos absolutos do que quando o seu valor é pequeno. Isto é verdade, pois sendo  $a_{pert} = a_{ij}^{lk} + n \cdot \sigma$ , onde  $n \sim N(0,1)$ , o valor perturbado  $a_{pert} \sim N(a_{ij}^{lk}, \sigma^2)$  e como o desvio padrão  $\sigma$  pode ser estimado por  $s$  e este pode ser substituído por  $s = a_{ij}^{lk} \cdot CV$ , o valor perturbado pode ser descrito através da fórmula:

$$a_{pert} = a_{ij}^{lk} + n \cdot s = a_{ij}^{lk} + n \cdot a_{ij}^{lk} \cdot CV = a_{ij}^{lk} \cdot (1 + n \cdot CV).$$

Deste modo tem-se no modelo de  $a_{pert}$  que  $a_{ij}^{lk}$  e  $s$  são considerados fixos (embora  $a_{ij}^{lk}$  tenha sido obtido de amostra), e:

$$E(a_{pert}) = E(a_{ij}^{lk} + n \cdot s) = a_{ij}^{lk} + s \cdot E(n) = a_{ij}^{lk} \quad e$$

$$V(a_{pert}) = V(a_{ij}^{lk} + n \cdot s) = 0 + V(n \cdot s) = s^2 \cdot V(n) = s^2 \cdot 1 = s^2.$$

Para cada nível de variação nos coeficientes de produção obteve-se uma amostra de 100 valores da Função Objetivo, cujas estatísticas estão apresentadas na Tabela 58. O valor  $\overline{FO}$  representa a média dos 100 valores da amostra e  $s$  seu desvio padrão. Foi calculado o coeficiente de variação  $CV$  da amostra, como também a semi-amplitude do intervalo de

confiança para a média ao nível de 95% e a amplitude dos valores gerados após a aleatorização dos dados de produção. Outros tamanhos de amostra  $n$  também são aconselháveis ( $n \geq 100$ ).

No Anexo 7 estão apresentadas algumas amostras das simulações feitas nos coeficientes de produção.

Fazendo um teste de hipóteses sobre os valores obtidos, para cada nível de variação, para verificar se a média difere estatisticamente do valor obtido no modelo básico, encontraram-se os resultados da Tabela 59. Define-se  $p$  como sendo a área máxima que a região crítica poderia assumir e ainda  $H_0$  ser verdadeira.

TABELA 58: ESTATÍSTICAS DA AMOSTRA DE FUNÇÕES OBJETIVOS COM PERTURBAÇÕES NORMAIS EM DADOS DE PRODUÇÃO

CV em $a_{ij}^{lk}$	0%	10%	20%	30%
$\overline{FO}$ (US\$)	49.667.472,20	49.682.040,90	50.624.533,60	49.892.906,80
Desvio padrão(US\$)	0,00	2.692.947,12	4.354.311,58	6.551.788,26
CV da FO (%)	0,00	5,42	8,60	13,13
Valor mínimo (US\$)	49.667.472,20	42.872.266,50	41.816.182,30	34.614.367,30
Valor máximo (US\$)	49.667.472,20	56.051.791,80	59.680.802,30	65.280.654,50
Amplitude (US\$)	0,00	13.179.525,30	17.864.620,00	30.666.287,20
Semi-amplitude do intervalo confiança para média (US\$)	0,00	527.807,16	853.428,12	1.284.125,00

TABELA 59: TESTE DE HIPÓTESES PARA  $\overline{FO}_{pert}$  NORMAL - dados de produção

Hipótese $H_0$	Valor de $z$ calculado	Valor $p$	Resultado
$H_0: \overline{FO}_{pert10} = FO_{básico}$	0,054	0,9602	aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert20} = FO_{básico}$	2,197	0,0278	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert30} = FO_{básico}$	0,344	0,7338	aceita $H_0$

As hipóteses  $H_0$  foram aceitas com valor  $p > 0,05$ , com exceção para a situação de  $CV=20\%$ , o que quer dizer que não existe diferença estatística entre os valores encontrados para as médias das perturbações e o valor  $FO_{\text{básico}}$  do modelo básico nos casos de  $CV=10\%$  e  $CV=30\%$ . Este resultado significa que em média os valores da receita encontrada, após a perturbação, não diferem significativamente do valor encontrado quando se usam as estimativas dos valores esperados de produção, pelo menos nos casos de  $CV=10$  e  $30\%$ . Este é um bom resultado, no sentido de que  $E(\max FO) \approx \max E(FO)$ . Para o caso onde  $CV=20\%$ , recomenda-se fazer uma avaliação melhor do valor  $p$  encontrado, porque não houve uma explicação para o fato dele ser pequeno ( $p < 0,05$ ). A sugestão seria a repetição de novas simulações e a partir daí calcular um valor médio de  $p$ .

A dispersão dos valores de  $FO$  tende a aumentar de uma forma quase linear, com o aumento dos coeficientes de variação dos dados de produção, porém numa proporção menor.

Os resultados dos  $CV$ 's estão na Tabela 60.

As simulações fornecem em vez de um único valor  $FO_{\text{básico}}$  como retorno, uma série de valores. Com os 100 valores simulados fez-se um histograma para observar a frequência dos valores de  $FO$  que ocorreram.

TABELA 60:  $CV$  DOS DADOS DE PRODUÇÃO x  $CV$  DA  $FO$  - PERTURBAÇÃO NORMAL

$CV$ dados de produção (%)	$CV$ da Função Objetivo (%)
0,0	0,0
10,0	5,4
20,0	8,6
30,0	13,1

Através do teste de Filliben, verificou-se que os dados obtidos nas simulações pertencem a uma distribuição normal, já que a correlação entre os 100 valores de  $FO$  da amostra com os 100 valores respectivos de uma normal padrão  $N(0,1)$  é alta.

Nos três casos o coeficiente de correlação  $r > r_{critico}$ , a um nível de confiança de 95%, onde o valor  $r_{critico}$  pode ser obtido por FILLIBEN (1975). Os valores do teste estão na Tabela 61.

TABELA 61: RESULTADOS DO TESTE DE FILLIBEN NA AMOSTRA DE  $FO$ , COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NOS DADOS DE PRODUÇÃO

CV dados (%)	Coeficiente de correlação $r$ entre amostra x $N(0,1)$	$r_{critico}$
10	0,997	0,986
20	0,992	0,986
30	0,994	0,986

Pelo fato das saídas serem normais é garantido o uso de todas as propriedades da distribuição normal podendo-se fazer inferências paramétricas sobre esta variável, tais como:

1. Combinação linear de variáveis aleatórias normais independentes é normal.
2. O teorema central do limite.
3. Cálculo de probabilidades através da distribuição de  $N(0,1)$ .

Por exemplo, para a distribuição resultante da perturbação nos coeficientes de produção com  $CV=10\%$ , a probabilidade de se ter uma receita menor que  $R$  é dada por

$$P \left( z < \frac{R - 49.682.040,90}{2.692.947,12} \right), \quad z \sim N(0,1) \text{ onde a média e o desvio padrão amostrais são os da}$$

Tabela 58. Este cálculo pode ser feito em qualquer pacote estatístico disponível no mercado.

Conclui-se que o produto das simulações fornece uma base mais adequada para tomada de decisões, sendo que o gerente responsável pelas decisões tem uma infinidade de posições



risco - retorno para considerar, em vez de um único ponto estimado, conforme Figura 19. A integral da função densidade de probabilidade  $f$ , representada no eixo das ordenadas,

$$\int_{-\infty}^R f(r) dr, \text{ dá a probabilidade de se ter uma receita } \leq R.$$

Os valores acima do valor esperado não oferecem desvantagem para a empresa, porém valores abaixo dele representam perda no valor final estimado no planejamento e devem ser examinadas com cuidado.

Um intervalo de confiança para a média pode ser calculado, por exemplo, para a situação onde  $CV = 10\%$ , tem-se o desvio padrão da média igual a

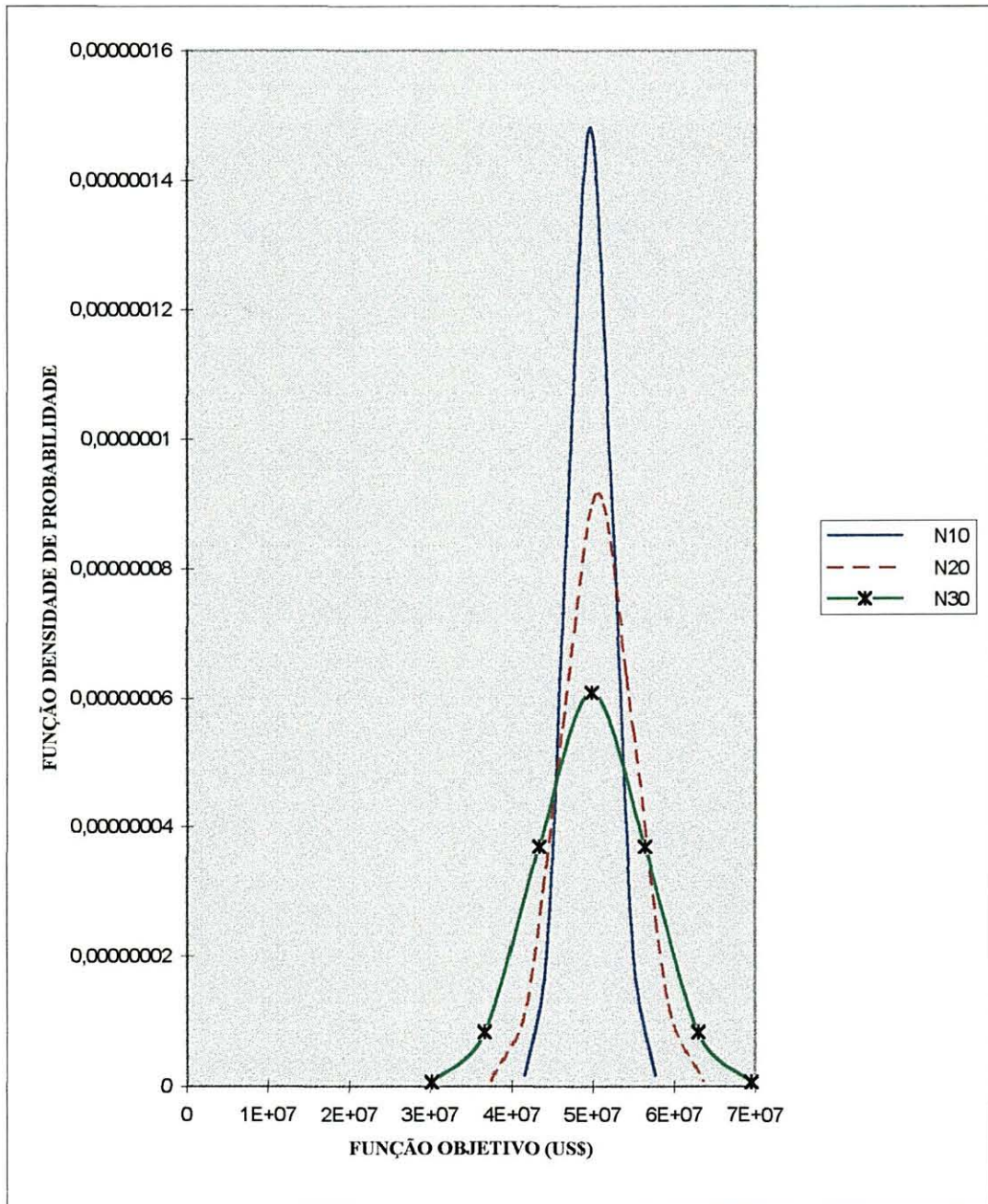
$$s_{FO_{pert}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2.692.947,12}{\sqrt{100}} = 269.294,71 \text{ e o intervalo de confiança de nível } (1-\alpha) \text{ é dado por}$$

$P(\overline{FO} - t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{pert}} \leq FO \leq \overline{FO} + t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{pert}}) = 1 - \alpha$ . Com 95% de confiança encontra-se o intervalo (49.148.837,00 , 50.215.244,00). Estes cálculos garantem com 95% de chance que este intervalo contém a média da população.

No planejamento de uma empresa florestal as informações obtidas por simulação com base em dados amostrais reais é extremamente importante, já que seria impossível repetir o planejamento inúmeras vezes, ou em inúmeras empresas ao mesmo tempo e nas mesmas condições. A simulação faz este papel, contribuindo com os valores possíveis da receita , o seu valor médio e desvio padrão estimados.

Então, dependendo do grau de informação que o gerente possui em relação à variabilidade dos coeficientes de produção, em relação à média considerada  $a_{ij}^{lk}$ , ele pode ter uma visão concreta do risco que está correndo em termos de receita líquida no empreendimento florestal, através da distribuição  $N(\overline{FO}_{pert}, CV \cdot \overline{FO}_{pert})$ .

FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO COM PERTURBAÇÕES NORMAIS EM DADOS DE PRODUÇÃO



#### 4.3.1.2 Simulações uniformes

Em termos de variabilidade, a dispersão na distribuição uniforme com amplitude de  $2.1/3. a_{ij}^{lk}$  é mais ou menos a mesma que da normal com  $CV=10\%$  ou  $s = 0,1. a_{ij}^{lk}$ . Supondo que  $a_{ij}^{lk} = 100 \text{ m}^3/\text{ha}$ , os valores que os dados de produção poderiam assumir numa normal com  $CV=10\%$  estariam dentro do intervalo  $[70,130]$  com 99% de probabilidade e na uniforme, entre  $[67,133]$  com 100% de probabilidade. A diferença está na probabilidade de ocorrência do coeficiente de produção. No caso normal, a chance de ocorrerem valores próximos da média é maior do que longe dela e, no caso uniforme, a chance é a mesma para qualquer valor. Desta forma, a perturbação uniforme pode ser considerada mais crítica, no sentido de que ela pode alterar muito mais os dados de produção, supostos conhecidos em média.

Da mesma forma, se  $a_{ij}^{lk} = 100 \text{ m}^3/\text{ha}$ , na normal com  $CV=20\%$  e  $s = 0,2. a_{ij}^{lk}$ , os valores dos dados de produção pertencem ao intervalo  $[40,160]$ , com 99% de chance. Na uniforme com amplitude de  $2.1/2. a_{ij}^{lk}$ ,  $a_{pert}$  pertence ao intervalo  $[50,150]$ .

Se  $a_{ij}^{lk} = 100 \text{ m}^3/\text{ha}$ , quando  $CV=30\%$  e  $s=0,3. a_{ij}^{lk}$ , na normal os valores dos dados de produção pertencem ao intervalo  $[10,190]$ , com 99% de chance. Na uniforme, com amplitude de  $2.2/3. a_{ij}^{lk}$ ,  $a_{pert}$  pertence ao intervalo  $[33,167]$ .

Não foi considerado amplitude de  $2.1. a_{ij}^{lk}$ , pois  $a_{pert}$  pertenceria ao intervalo  $[0,200]$  e muitas produções poderiam ser muito baixas, o que além de não representar uma situação real, traria dificuldades de factibilização no sistema, acarretando compras dos vários produtos que não poderiam ser atendidos pela produção própria.

Para cada amplitude considerada na perturbação dos coeficientes de produção  $a_{ij}^{lk}$  através da distribuição uniforme, observaram-se numa amostra de 100 simulações as estatísticas apresentadas na Tabela 62.

Fazendo um teste de hipóteses sobre as médias obtidas, para verificar se elas diferem significativamente do valor obtido no modelo básico, foram obtidos os resultados que estão na Tabela 63.

Todas hipóteses  $H_0$  foram aceitas, o que quer dizer que não existe diferença significativa entre os valores encontrados para as médias das perturbações e o valor  $FO_{\text{básico}}$  do modelo básico.

Neste caso também a dispersão dos valores de  $FO$  tende a aumentar de uma forma quase linear, com o aumento das amplitudes da distribuição uniforme dos dados de produção, conforme se observa na Tabela 64.

TABELA 62: ESTATÍSTICAS DA AMOSTRA DE FUNÇÕES OBJETIVOS COM PERTURBAÇÕES UNIFORMES EM DADOS DE PRODUÇÃO

Amplitude ( $2 \times t \times a_{ij}$ )	Amplitude 0	Amplitude $2 \cdot 1/3 \cdot a_{ij}$	Amplitude $2 \cdot 1/2 \cdot a_{ij}$	Amplitude $2 \cdot 2/3 \cdot a_{ij}$
$FO(\text{US\$})$	49.667.472,20	49.691.234,50	48.882.285,60	49.547.575,00
Desvio padrão(US\$)	0,00	3.417.224,62	4.771.649,93	6.767.870,26
CV da FO (%)	0,00	6,90	9,76	13,70
Valor mínimo(US\$)	49.667.472,20	42.054.392,20	37.607.545,40	33.847.372,80
Valor máximo(US\$)	49.667.472,20	56.959.488,50	59.102.435,10	67.085.577,50
Amplitude (US\$)	0,00	14.905.096,30	21.494.889,70	33.238.204,70
Semi-amplitude do int. de confiança para média (US\$)	0,00	669.762,73	935.224,82	1.326.476,23

TABELA 63: TESTE DE HIPÓTESES PARA  $\overline{FO}_{pert}$  UNIFORME - dados de produção

Hipótese $H_0$	Valor de z calculado	Valor $p$	Resultado
$H_0: \overline{FO}_{pert1-3} = FO_{básico}$	0,0695	0,9442	aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert1-2} = FO_{básico}$	-1,6455	0,0992	aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert2-3} = FO_{básico}$	-0,1772	0,8572	aceita $H_0$

TABELA 64: AMPLITUDE DOS DADOS DE PRODUÇÃO x CV DA FO - perturbação uniforme

Amplitude dados de produção ( $2 \times t \times a_{ij}$ )	CV da Função Objetivo (%)
$t = 0$	0,00
$t = 1/3$	6,90
$t = 1/2$	9,76
$t = 2/3$	13,70

Como no caso normal, as simulações fornecem em lugar de um único valor  $FO_{básico}$  como retorno, uma série de valores.

As amostras em cada situação foram testadas quanto ao nível de normalidade, através do teste de Filliben; os resultados estão na Tabela 65.

TABELA 65: RESULTADOS DO TESTE DE FILLIBEN NA AMOSTRA DE FO, COM PERTURBAÇÕES UNIFORMES NOS DADOS DE PRODUÇÃO

Valor de $t$	Nível de confiança	$r_{crítico}$	Correlação $r$ : amostra x $N(\overline{FO}_{pert}, s)$
1/3	95%	0,986	0,993
1/2	95%	0,986	0,996
2/3	95%	0,986	0,997

Como em todos os três testes  $r \geq r_{\text{crítico}}$ , conclui-se que as amostras são normais.

Conclui-se também que independente de como os dados de produção tenham sido perturbados, seja através de uma distribuição normal ou uniforme, a distribuição de saída das Funções Objetivas, para o modelo que está sendo analisado, é normal.

Sendo esta situação mais crítica em termos de variabilidade do que a simulação normal, observa-se que os coeficientes de variação da Função Objetivo são maiores que os obtidos na situação anterior. Os limites de variação possíveis também aumentaram como era previsível, conforme pode ser observado nas amplitudes das distribuições da Figura 20. Os limites inferiores, dentro da probabilidade de ocorrência de 95%, podem ocorrer dentro de uma previsão de quase catástrofe, quando as produções de todas as regiões devem cair.

#### 4.3.1.3 Cenários sistemáticos

O cenário testado foi o de reduzir e aumentar sistematicamente todos os coeficientes de produção da matriz tecnológica  $A$ , da forma  $a_{pert} = ALFA \cdot a_{ij}^{lk}$ , onde  $ALFA$  é um valor constante.

Os valores da Função Objetivo, para alguns valores de  $ALFA$  estão representados na Tabela 66.

Observa-se na Figura 21 e na Tabela 66 uma variação quase linear nos valores de  $FO$ , para variações lineares de  $ALFA$ , a uma taxa mais ou menos constante de US\$5.400.000,00 para cada unidade de 0,1 de  $ALFA$ . Isto significa que a cada diminuição de 10% em todos os dados de produção a receita tende a diminuir em torno de 11%.

FIGURA 20: DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO COM PERTURBAÇÕES UNIFORMES EM DADOS DE PRODUÇÃO

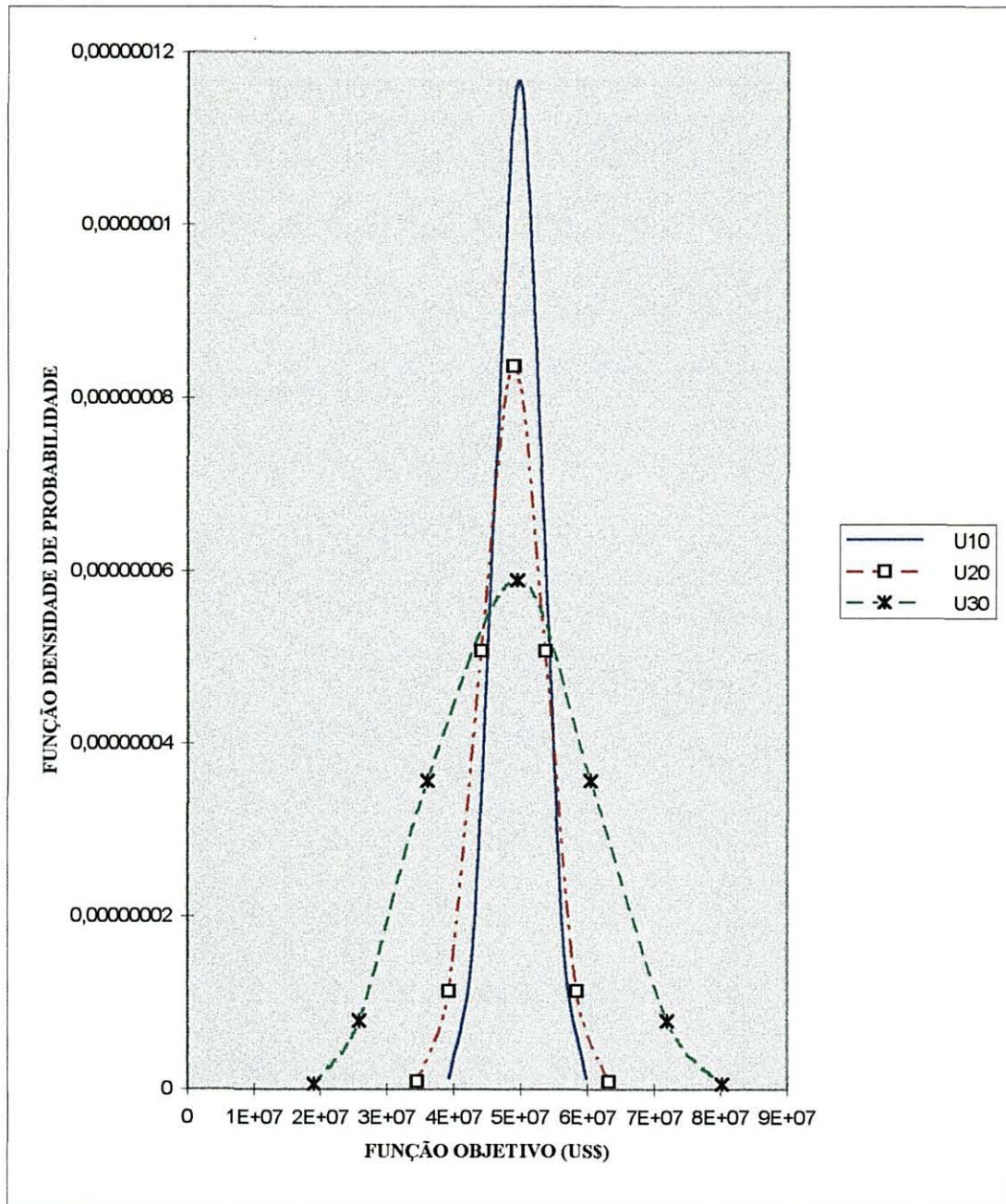


FIGURA 21: EFEITO NA FUNÇÃO OBJETIVO, DAS VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS DADOS DE PRODUÇÃO

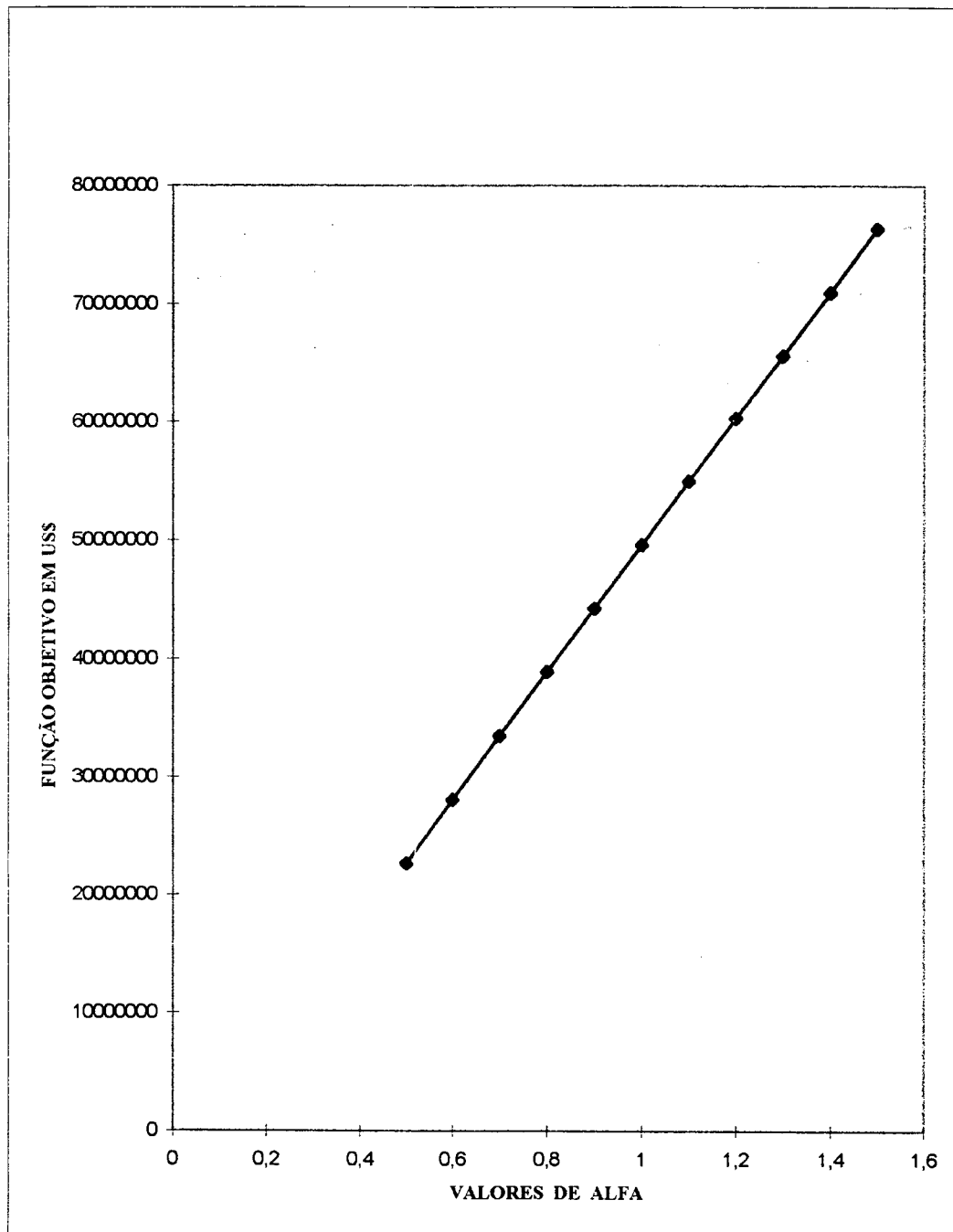




TABELA 66: VALORES DE *FO* PARA VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS EM DADOS DE PRODUÇÃO

<i>ALFA</i>	Função Objetivo (US\$)	Diferença entre valores de <i>FO</i> (US\$)
0,5	22.670.956,00	5.420.576,00
0,6	28.091.532,00	5.419.221,00
0,7	33.510.753,00	5.399.623,00
0,8	38.910.376,00	5.380.020,00
0,9	44.290.396,00	5.377.076,00
1,0	49.667.472,00	5.376.535,00
1,1	55.035.007,00	5.331.520,00
1,2	60.366.527,00	5.345.742,00
1,3	65.712.269,00	5.303.123,00
1,4	71.015.392,00	5.365.413,00
1,5	76.380.805,00	

#### 4.3.2 Análise das simulações estocásticas e dos cenários dos custos de manejo

##### 4.3.2.1 Simulações normais

Cada custo de manejo  $c_{ij}$  foi perturbado por um ruído com uma distribuição normal, para diferentes coeficientes de variação. A perturbação foi feita proporcional ao valor médio do custo, como feito na perturbação dos coeficientes de produção. O valor do custo perturbado é calculado por  $c_{pert} = c_{ij} + n \cdot \sigma$ , onde  $n \sim N(0,1)$ , gerado aleatoriamente. Então  $c_{pert} \sim N(c_{ij}, \sigma^2)$  e representa qualquer custo aleatório da distribuição considerada.

Usando a estimativa do desvio padrão  $\sigma$ , igual a  $s = c_{ij} \cdot CV$  então o valor do custo perturbado pode ser calculado por  $c_{pert} = c_{ij} + n \cdot c_{ij} \cdot CV = c_{ij} \cdot (1 + n \cdot CV)$ . Deste modo tem-

se no modelo de  $c_{pert}$  que  $c_{ij}$  e  $s$  são considerados fixos, embora  $c_{ij}$  tenha sido obtido de amostra, e:

$$E(c_{pert}) = E(c_{ij} + n \cdot s) = c_{ij} + s \cdot E(n) = c_{ij} \text{ e}$$

$$V(c_{pert}) = V(c_{ij} + n \cdot s) = 0 + V(n \cdot s) = s^2 \cdot V(n) = s^2 \cdot 1 = s^2.$$

Para cada nível de variação nos custos de manejo produziu-se uma amostra de 100 valores da Função Objetivo, com as estatísticas apresentadas na Tabela 67.

TABELA 67: ESTATÍSTICAS DA AMOSTRA DE FUNÇÕES OBJETIVOS COM PERTURBAÇÕES NORMAIS EM CUSTOS DE MANEJO

	CV=0% em $c_{ij}$	CV =10% em $c_{ij}$	CV =20% em $c_{ij}$	CV =30% em $c_{ij}$
$\overline{FO}$ (US\$)	49.667.472,20	49.864.072,20	50.639.818,80	52.404.269,00
Desvio padrão(US\$)	0,00	1.811.994,99	3.628.475,00	5.571.073,37
CV da FO (%)	0,00	3,63	7,17	10,60
Valor mínimo (US\$)	49.667.472,20	45.502.772,00	41.010.372,70	40.177.889,20
Valor máximo (US\$)	49.667.472,20	53.629.249,20	58.615.691,40	66.206.731,10
Amplitude (US\$)	0,00	8.126.477,17	17.605.318,70	26.028.841,90
Semi-amplitude do intervalo confiança para média (US\$)	0,00	355.143,97	711.166,98	1.091.908,70

Através de teste de hipóteses sobre as médias obtidas, verificou-se que só a média relativa ao CV de 10% é que é significativamente igual ao valor encontrado de FO no problema básico; os resultados estão na Tabela 68.

Em relação às duas últimas hipóteses  $H_0$  que não foram aceitas, pode-se afirmar que o valor médio de FO obtido das simulações difere do valor  $FO_{básico}$  do modelo básico, sendo nos dois casos um valor maior.

TABELA 68: TESTE DE HIPÓTESES PARA  $\overline{FO}_{pert}$  NORMAL - custos de manejo

Hipótese $H_0$	Valor de $z$ calculado	Valor $p$	Resultado
$H_0: \overline{FO}_{pert10} = FO_{básico}$	1,0850	0,2757	aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert20} = FO_{básico}$	2,6798	0,0074	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert30} = FO_{básico}$	4,9125	$\approx 0$	não aceita $H_0$

A dispersão dos valores de  $FO$  também tende a aumentar de uma forma quase linear, com o aumento dos coeficientes de variação da distribuição dos custos de manejo, porém a uma taxa bem menor que dos valores registrados para os dados de produção, conforme se observa na Tabela 69.

TABELA 69: CV DOS CUSTOS DE MANEJO x CV DA  $FO$  - Perturbação normal

CV custos de manejo (%)	CV da Função Objetivo (%)
0,0	0,0
10,0	3,6
20,0	7,2
30,0	10,6

Através do teste de Filliben, verificou-se que os valores de  $FO$  obtidos nas simulações pertencem a uma distribuição normal, já que a correlação entre os 100 dados com os 100 valores respectivos de uma normal padrão  $N(0,1)$  é alta, com exceção do caso  $CV=10\%$ , que passou no teste ao nível de 99% ou  $p=0,01$ . Os valores encontrados estão na Tabela 70.

A chance de se ter uma receita menor que um valor  $R$  pode ser obtido por

$$P\left(z < \frac{R - \overline{FO}_{pert}}{s_{amostra}}\right), z \sim N(0,1), \text{ para uma variabilidade conhecida.}$$

Desta forma pode-se calcular a chance de se ter valores para a receita, menor do que qualquer valor crítico, através de qualquer pacote estatístico a disposição no mercado.

TABELA 70: RESULTADOS DO TESTE DE FILLIBEN NA AMOSTRA DE  $FO$ , COM PERTURBAÇÕES NORMAIS EM CUSTOS DE MANEJO

CV custos	Nível de confiança	Correlação $r$ : amostra x $N(0,1)$	$r_{\text{crítico}}$
10%	95%	0,985	0,986
	99%	0,985	0,981
20%	95%	0,996	0,986
30%	95%	0,997	0,986

Novamente, o produto das simulações fornece uma distribuição de valores de retorno financeiro para tomada de decisões, sendo que o gerente tem uma infinidade de posições risco - retorno para considerar em vez de um único ponto estimado, conforme mostra a Figura 22. Os valores acima do valor esperado para  $FO$  no problema básico, não oferecem desvantagem para a empresa, porém valores abaixo dele representam perda do valor final estimado no planejamento.

O intervalo de confiança para a média pode ser calculado para cada situação. Por exemplo, para a situação com  $CV=10\%$ , primeiro calcula-se o desvio padrão da média ou erro

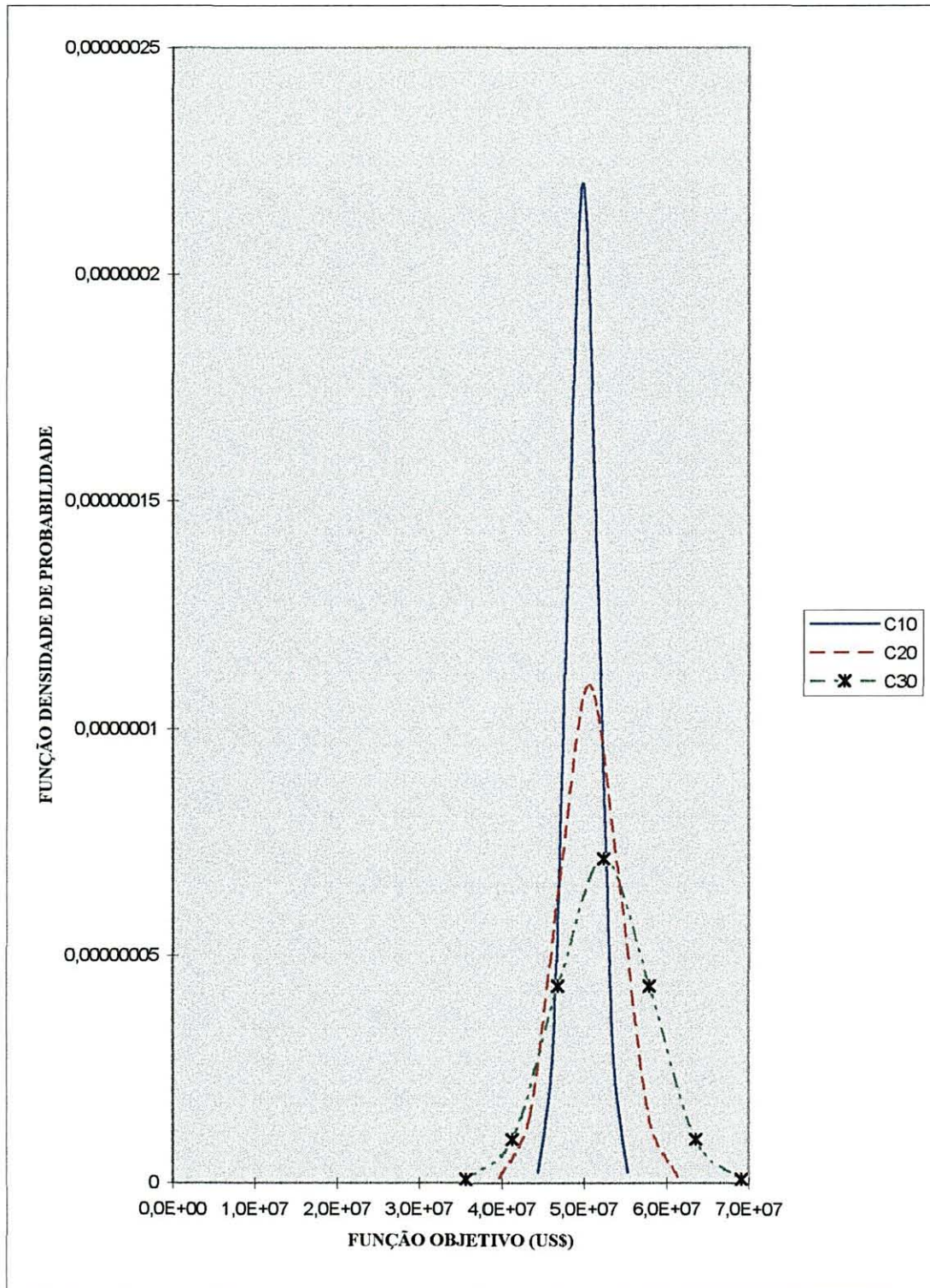
$$\text{padrão por } s_{FO_{\text{pert}}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1.811.994,99}{\sqrt{100}} = 181.199,50.$$

O intervalo de confiança de nível  $(1-\alpha)$  é dado por

$$P(\overline{FO} - t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{\text{pert}}} \leq FO \leq \overline{FO} + t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{\text{pert}}}) = 1 - \alpha.$$

Com 95% de confiança, encontra-se o intervalo (49.504.391,19 , 50.223.753,20).

FIGURA 22: DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NOS CUSTOS DE MANEJO



Estes cálculos garantem com 95% de chance que este intervalo contém a média da população.

Não sendo exequível repetir o planejamento inúmeras vezes, a simulação representa estes cenários e em função da repetição, obtém-se uma gama de valores possíveis que  $FO$  pode assumir.

Como se está interessado no valor real que pode ocorrer, dependendo do grau de informação que o gerente possui em relação à variabilidade dos custos de manejo em relação ao valor médio considerado  $c_{ij}$ , ele pode ter uma visão concreta do risco que está correndo em termos de receita líquida no empreendimento florestal, através da distribuição  $N(\overline{FO}_{pert}, CV \cdot \overline{FO}_{pert})$ .

#### 4.3.2.2 Cenários sistemáticos

Foram simuladas situações em que sistematicamente os custos de manejo caem e aumentam de uma taxa  $ALFA$ , proporcional ao valor médio do custo, através da fórmula

$$c_{pert} = ALFA \cdot c_{ij}.$$

Os valores de  $ALFA$  e de  $FO$  estão representados na Tabela 71.

Na Figura 23 estão representados graficamente os valores de  $FO$ .

Observa-se uma variação quase linear de  $FO$  para variações lineares de  $ALFA$ , com uma tendência a cair menos quando os custos aumentam a partir do valor médio, como observado nas diferenças de variação apresentadas na Tabela 71.

FIGURA 23: EFEITO NA FUNÇÃO OBJETIVO, DAS VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS DOS CUSTOS DE MANEJO

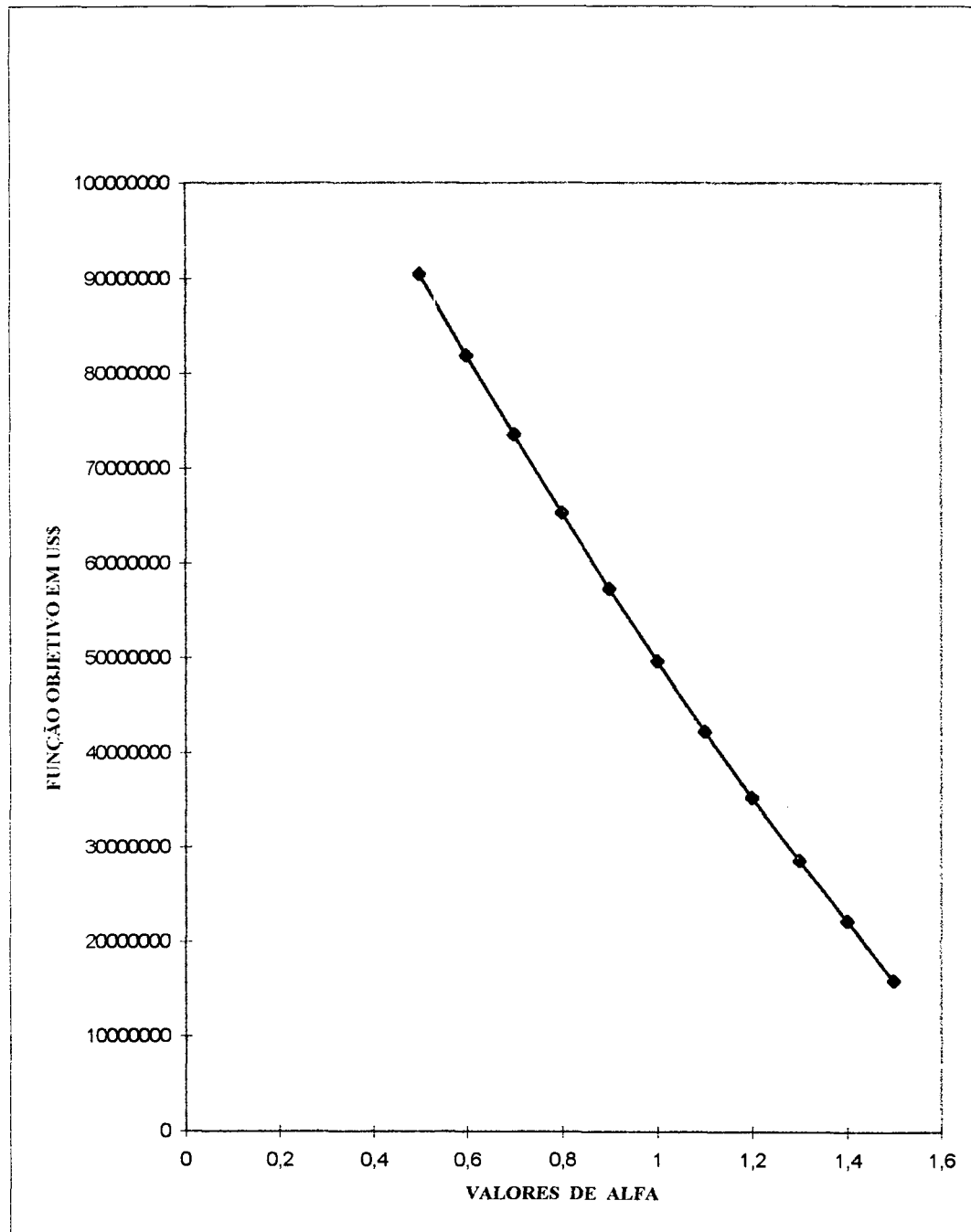


TABELA 71: VALORES DE *FO* PARA VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS CUSTOS DE MANEJO

<i>ALFA</i>	Função Objetivo (US\$)	Diferença entre os valores de <i>FO</i> (US\$)
0,5	90.529.062,00	8.608.489,00
0,6	81.920.573,00	8.365.914,00
0,7	73.554.659,00	8.174.763,00
0,8	65.379.896,00	8.006.149,00
0,9	57.373.747,00	7.706.275,00
1,0	49.667.472,00	7.346.210,00
1,1	42.321.262,00	6.935.423,00
1,2	35.385.839,00	6.684.989,00
1,3	28.700.850,00	6.417.172,00
1,4	22.283.678,00	6.272.178,00
1,5	16.011.500,00	

#### 4.3.3 Análise das simulações estocásticas e dos cenários dos preços dos produtos

##### 4.3.3.1 Simulações normais

Os preços dos 10 produtos  $P_{ik}$  foram perturbados por um ruído com uma distribuição normal, para coeficientes de variação de 10, 20, e 30%. A perturbação foi feita proporcional ao valor médio do preço, como para as outras variáveis já analisadas.

O preço perturbado foi calculado por  $P_{pert} = P_{ik} + n \cdot \sigma$ , onde  $n \sim N(0,1)$  sendo gerado aleatoriamente. Então  $P_{pert} \sim N(P_{ik}, \sigma^2)$  é qualquer preço da distribuição considerada.

Trabalhando com o desvio padrão amostral  $s = P_{ik} \cdot CV$ , tem-se:

$$P_{pert} = P_{ik} + n \cdot P_{ik} \cdot CV = P_{ik} \cdot (1 + n \cdot CV).$$



Neste caso  $P_{lk}$  e  $s$  são considerados fixos na simulação, apesar de terem sido obtidos por amostragem, e:

$$E(P_{pert}) = E(P_{lk} + n \cdot s) = P_{lk} + s \cdot E(n) = P_{lk} \text{ e}$$

$$V(P_{pert}) = V(P_{lk} + n \cdot s) = 0 + V(n \cdot s) = s^2 \cdot V(n) = s^2 \cdot 1 = s^2.$$

Para cada nível de variação nos preços dos produtos gerou-se uma amostra de 100 valores da Função Objetivo, com estatísticas conforme Tabela 72.

TABELA 72: ESTATÍSTICAS DA AMOSTRA DE FUNÇÕES OBJETIVOS COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NOS PREÇOS DOS PRODUTOS

	$CV = 0\%$ em $P_{lk}$	$CV = 10\%$ em $P_{lk}$	$CV = 20\%$ em $P_{lk}$	$CV = 30\%$ em $P_{lk}$
$FO(\text{US\$})$	49.667.472,20	54.239.250,20	58.040.424,80	56.161.026,80
Desvio padrão(US\$)	0,00	7.260.106,17	15.024.391,90	16.419.171,00
$CV$ da $FO$ (%)	0,00	13,40	25,90	29,20
Valor mínimo(US\$)	49.667.472,20	39.186.183,10	22.411.418,80	23.371.290,40
Valor máximo(US\$)	49.667.472,20	73.809.948,30	93.975.330,10	96.828.702,50
Amplitude(US\$)	0,00	34.623.765,20	71.563.911,20	73.457.412,10
Semi-amplitude do intervalo de conf. para a média(US\$)	0,00	1.422.952,56	2.944.722,33	3.102.781,19

Observe-se que os valores mínimos e máximos assumem limites mais críticos que os das situações anteriores.

Através de teste de hipóteses sobre as médias obtidas das perturbações, verificou-se que nenhuma média é significativamente igual ao valor encontrado no problema padrão, conforme os resultados da Tabela 73, porém todos os valores são maiores que o valor de  $FO$  no problema básico.

TABELA 73: TESTE DE HIPÓTESES PARA  $\overline{FO}_{pert}$  NORMAL - preços dos produtos

Hipótese $H_0$	Valor de z calculado	Valor $p$	Resultado
$H_0: \overline{FO}_{pert10} = FO_{básico}$	6,2970	$\cong 0$	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert20} = FO_{básico}$	5,5729	$\cong 0$	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert30} = FO_{básico}$	4,1479	$\cong 0$	não aceita $H_0$

A dispersão dos valores de  $FO$  é maior que a usada para fazer a perturbação nos preços, conforme a Tabela 74, com exceção para  $CV=30\%$ .

TABELA 74:  $CV$  DOS PREÇOS x  $CV$  DA  $FO$  - Perturbação normal

$CV$ preços dos produtos (%)	$CV$ da Função Objetivo (%)
0,0	0,0
10,0	13,4
20,0	25,9
30,0	29,2

Através do teste de Filliben, nas três situações verificou-se que os valores de  $FO$  obtidos nas simulações pertencem a uma distribuição normal, já que a correlação entre os 100 dados com os 100 valores respectivos de uma normal padrão  $N(0,1)$  é alta. Nos três casos, o coeficiente de correlação  $r > r_{crítico}$  e estão na Tabela 75.

TABELA 75: RESULTADOS DO TESTE DE FILLIBEN NA AMOSTRA DE  $FO$ , COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NOS PREÇOS

$CV$ preços	Correlação $r$ : amostra x $N(0,1)$	$r_{crítico}$	Nível de confiança, $gl=99$
10%	0,992	0,986	95%
20%	0,993	0,986	95%
30%	0,994	0,986	95%

A chance de se ter uma receita menor que um valor  $R$  é dada por

$$P\left(z < \frac{R - \overline{FO}_{pert}}{s_{amostra}}\right), \quad z \sim N(0,1), \text{ para uma variabilidade conhecida.}$$

Desta forma qualquer valor de  $R$  pode ser testado, usando qualquer pacote estatístico disponível no mercado.

Na Figura 24 vê-se como as simulações fornecem uma distribuição de valores de retorno financeiro para tomada de decisões, em vez de um único ponto estimado.

Os valores acima do valor esperado não oferecem desvantagem para a empresa, porém valores abaixo dele representam perda do valor final estimado no planejamento.

O intervalo de confiança para a média pode ser calculado.

Por exemplo, para a situação com  $CV=10\%$ , o desvio padrão da média é

$$s_{FO_{pert}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{7.260.106,17}{\sqrt{100}} = 726.010,62 \text{ e o intervalo de confiança de nível } (1-\alpha) \text{ é dado por}$$

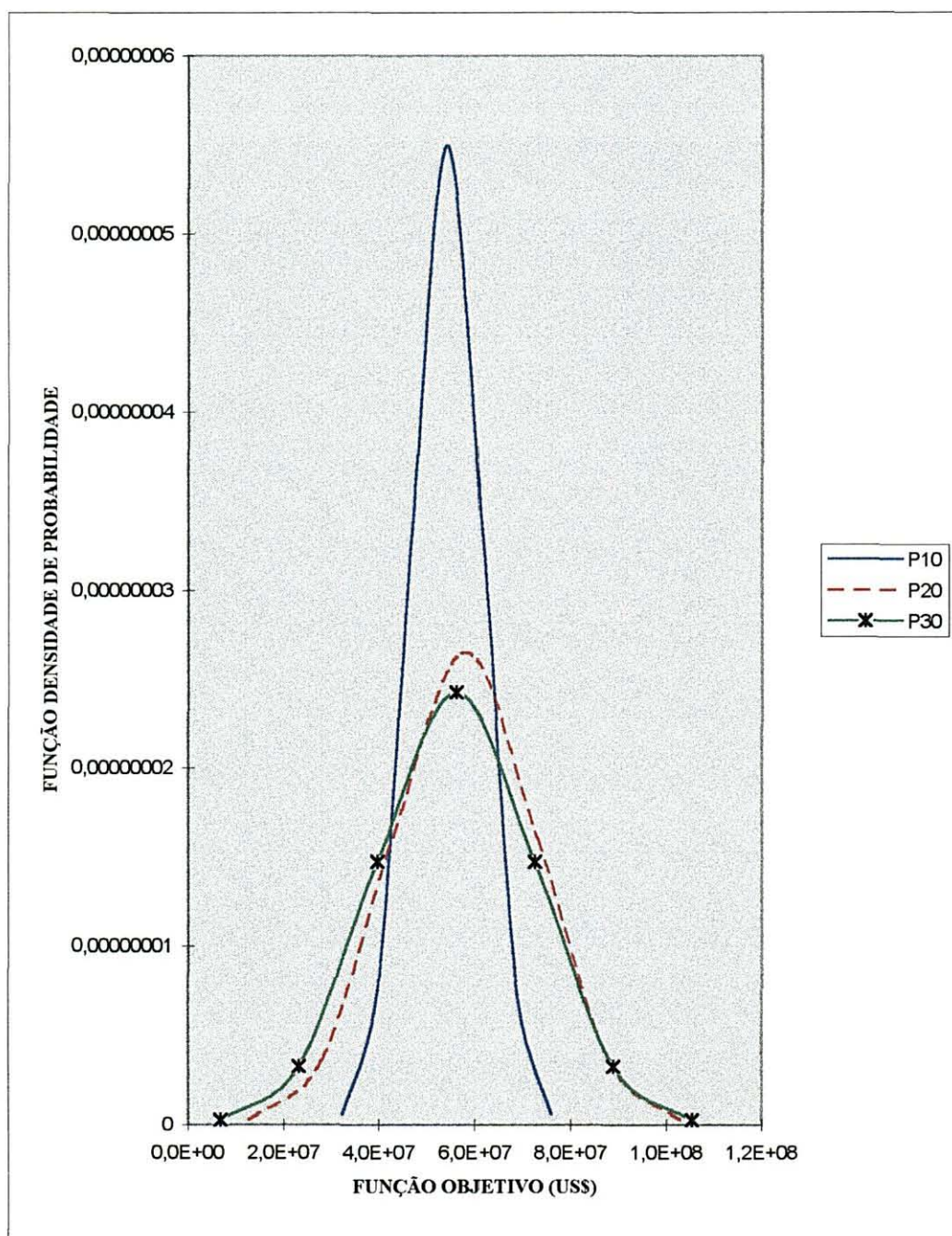
$$P(\overline{FO} - t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{pert}} \leq FO \leq \overline{FO} + t_{99}(1-\alpha) \cdot s_{FO_{pert}}) = 1 - \alpha.$$

Com 95% de confiança encontra-se o intervalo (52.794.489,36 , 55.684.011,63).

Estes cálculos garantem com 95% de chance que este intervalo contém a média da população.

A distribuição  $N(\overline{FO}_{pert}, CV \cdot \overline{FO}_{pert})$  fornece uma visão concreta do risco que a empresa está correndo em termos de receita líquida no empreendimento florestal, onde o  $CV$  depende do grau de informação que o gerente possui em relação ao nível de variação dos preços, em relação ao valor médio considerado  $P_{lk}$ .

FIGURA 24: DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NOS PREÇOS DOS PRODUTOS



#### 4.3.3.2 Cenários sistemáticos

Analogamente ao que já foi feito para as outras variáveis, os preços dos produtos  $P_{ik}$  foram sistematicamente aumentados e reduzidos da forma  $P_{pert} = ALFA \cdot P_{ik}$ , para avaliar o comportamento da  $FO$ .

Os valores encontrados estão representados na Tabela 76. Graficamente o comportamento de  $FO$  pode ser visto na Figura 25.

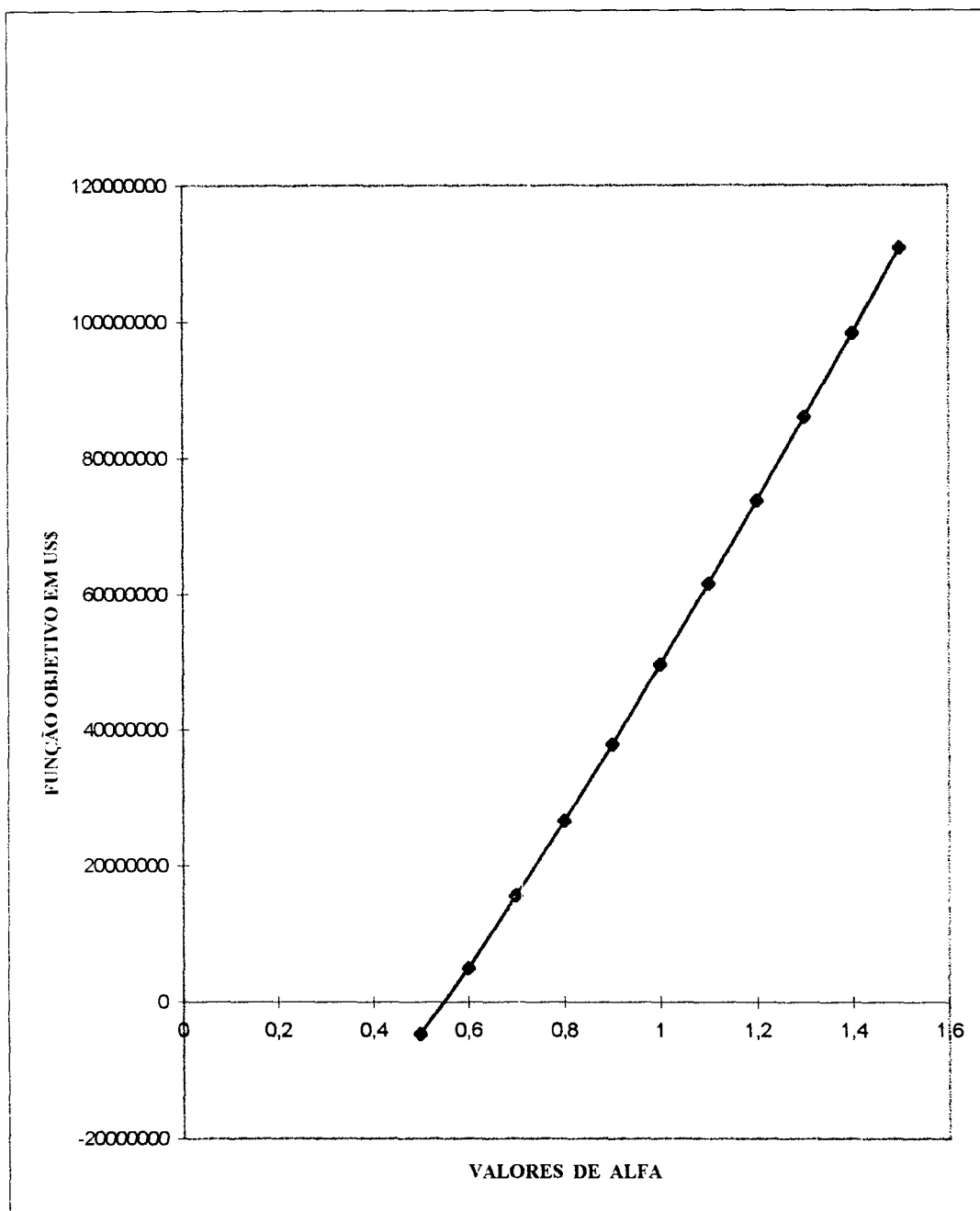
Observa-se um comportamento não linear de  $FO$  para variações lineares de  $ALFA$ . Para variações com  $ALFA < 1$  nos preços, existe uma tendência a não cair tanto o valor de  $FO$ , em relação a mesma proporção de  $ALFA > 1$ ; as taxas são menores para variações entre 0,5 a 0,8.

TABELA 76: VALORES DE  $FO$  PARA VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS PREÇOS DOS PRODUTOS

$ALFA$	Função Objetivo (US\$)	Diferença nos valores de $FO$ (US\$)
0,5	- 4.704.221,00	9.672.068,00
0,6	4.967.847,00	10.692.606,00
0,7	15.660.453,00	11.032.951,00
0,8	26.693.404,00	11.261.967,00
0,9	37.955.371,00	11.712.101,00
1,0	49.667.472,00	11.993.855,00
1,1	61.661.327,00	12.182.844,00
1,2	73.844.171,00	12.239.586,00
1,3	86.083.757,00	12.316.884,00
1,4	98.400.641,00	12.472.413,00
1,5	110.873.054,00	

As amplitudes dos valores de  $FO$  são bem maiores neste caso do que nos anteriores, o que significa que a influência dos preços nos resultados da  $FO$  é grande.

FIGURA 25 : EFEITO NA FUNÇÃO OBJETIVO, DAS VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS PREÇOS DOS PRODUTOS



#### 4.3.4 Análise das simulações e dos cenários das demandas dos produtos

##### 4.3.4.1 Simulações normais

As variáveis de demanda dos 10 produtos  $D_{lk}$  foram perturbados por um ruído com uma distribuição normal, para diferentes coeficientes de variação de 10, 20, e 30%. A perturbação foi feita proporcional ao valor da demanda e calculada por  $D_{pert} = D_{lk} + n \cdot \sigma$ , onde  $n \sim N(0,1)$  sendo gerado aleatoriamente. Logo,  $D_{pert} \sim N(D_{lk}, \sigma^2)$  sendo qualquer valor de demanda da distribuição considerada. Considerando-se o desvio padrão amostral igual a  $s = D_{lk} \cdot CV$ , então  $D_{pert} = D_{lk} + n \cdot D_{lk} \cdot CV \Rightarrow D_{pert} = D_{lk} \cdot (1 + n \cdot CV)$ .

Neste caso  $D_{lk}$  e  $s$  foram considerados fixos na simulação, apesar de terem sido obtidos por amostragem, portanto:

$$E(D_{pert}) = E(D_{lk} + n \cdot s) = D_{lk} + s \cdot E(n) = D_{lk} \text{ e}$$

$$V(D_{pert}) = V(D_{lk} + n \cdot s) = 0 + V(n \cdot s) = s^2 \cdot V(n) = s^2 \cdot 1 = s^2.$$

Para cada nível de variação das demandas dos produtos encontrou-se uma amostra de 100 valores da Função Objetivo, com as estatísticas conforme Tabela 77.

Através de teste de hipóteses sobre os valores médios de  $FO$  obtidos, verificou-se que nenhuma média é significativamente igual ao valor de  $FO$  no problema padrão, conforme os valores encontrados nos cálculos da Tabela 78.

A dispersão dos valores de  $FO$  praticamente não variou em relação aos valores usados para fazer a perturbação nas demandas, conforme os valores da Tabela 79.

Através do teste de Filliben, nas três situações verificou-se que os valores de  $FO$  obtidos nas simulações não pertencem a uma distribuição normal, já que a correlação entre os 100 valores encontrados com os 100 valores respectivos de uma normal padrão  $N(0,1)$  é baixa. Nos três casos, o coeficiente de correlação  $r < r_{\text{critico}}$ , como encontrado na Tabela 80.

TABELA 77: ESTATÍSTICAS DA AMOSTRA DE FUNÇÕES OBJETIVOS COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NAS DEMANDAS DOS PRODUTOS

	CV=0% em	CV=10% em	CV=20% em	CV=30% em
	$D_{ik}$	$D_{ik}$	$D_{ik}$	$D_{ik}$
$\overline{FO}$ (US\$)	49.667.472,20	49.610.100,70	49.379.116,40	48.913.795,40
Desvio padrão (US\$)	0,00	117.604,46	271.126,81	947.827,62
CV da FO (%)	0,00	0,24	0,55	1,94
Valor mínimo (US\$)	49.667.472,20	49.288.399,10	48.429.360,20	43.582.496,20
Valor máximo (US\$)	49.667.472,20	50.260.073,60	49.726.477,30	49.902.320,50
Amplitude (US\$)	0,00	971.674,57	1.297.117,03	6.319.824,33
Semi-amplitude do intervalo de confiança da média (US\$)	0,00	23.050,02	53.139,80	187.656,57

TABELA 78: TESTE DE HIPÓTESES PARA  $\overline{FO}_{pert}$  NORMAL - demandas dos produtos

Hipótese $H_0$	Valor de z calculado	Valor $p$	Resultado
$H_0: \overline{FO}_{pert10} = FO_{básico}$	- 4,878	$\cong 0$	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert20} = FO_{básico}$	-10,635	$\cong 0$	não aceita $H_0$
$H_0: \overline{FO}_{pert30} = FO_{básico}$	- 7,952	$\cong 0$	não aceita $H_0$

TABELA 79: CV DAS DEMANDAS x CV DA FO - Perturbação normal

CV demandas dos produtos (%)	CV da Função Objetivo (%)
0,00	0,00
10,00	0,24
20,00	0,55
30,00	1,94



TABELA 80: RESULTADOS DO TESTE DE FILLIBEN NA AMOSTRA DE  $FO$ , COM PERTURBAÇÕES NORMAIS NAS DEMANDAS DOS PRODUTOS

$CV$ demandas	Correlação $r$ : amostra x $N(0,1)$	$r_{\text{critico}}$	Nível de confiança
10%	0,920	0,986	95% , $gl=99$
20%	0,954	0,986	95% , $gl=99$
30%	0,861	0,986	95% , $gl=99$

Apesar dos dados gerados na simulação não pertencerem a uma normal, a grande vantagem é que o coeficiente de variação  $CV$  das amostras em cada situação é muito pequeno. Isto significa que os valores de  $FO$  vão variar muito pouco, mesmo para os maiores níveis de  $CV$  usados nas distribuições dos valores de demanda.

O que acontece é que alterando a demanda, que pode ser de um valor até três vezes em relação ao seu valor médio (por exemplo, se  $D=1000 \text{ m}^3$ ,  $CV=30\%$ ,  $D_{\text{pert}}$  pode assumir um valor até  $1900 \text{ m}^3$  com 99% de chance), as restrições se acomodam e para serem atendidas, o ponto ótimo tende a modificar e cair. Pelo que se observa nos cenários sistemáticos, da seção 4.3.4.2, quando a demanda aumenta de uma proporção  $p$ , a queda da  $FO$  é menor proporcionalmente ao que aumenta  $FO$ , do que quando a demanda diminui da mesma proporção  $p$ . Isto também justifica porque as médias de cada situação perturbada é sempre menor do que a situação básica, como pode ser observado na Tabela 81.

TABELA 81: VALORES DE  $FO$  PARA PERTURBAÇÕES NORMAIS NAS DEMANDAS

Coefficiente de Variação nas demandas (%)	Valores médios da Função Objetivo (US\$)
0	49.667.472,20
10	49.610.100,70
20	49.379.116,40
30	48.913.795,40

Estes valores observados, revelam uma tendência de que alterando a demanda o valor médio da *FO* cai. Isto deve-se ao fato que das 100 situações geradas, estatisticamente 50 devem ser para melhor (demandas caem) e 50 para pior (demandas sobem) ; como *FO* cai mais do que sobe, para as situações análogas, a média das 100 situações tende a ser inferior que o valor obtido no modelo básico.

#### 4.3.4.2 Cenários sistemáticos

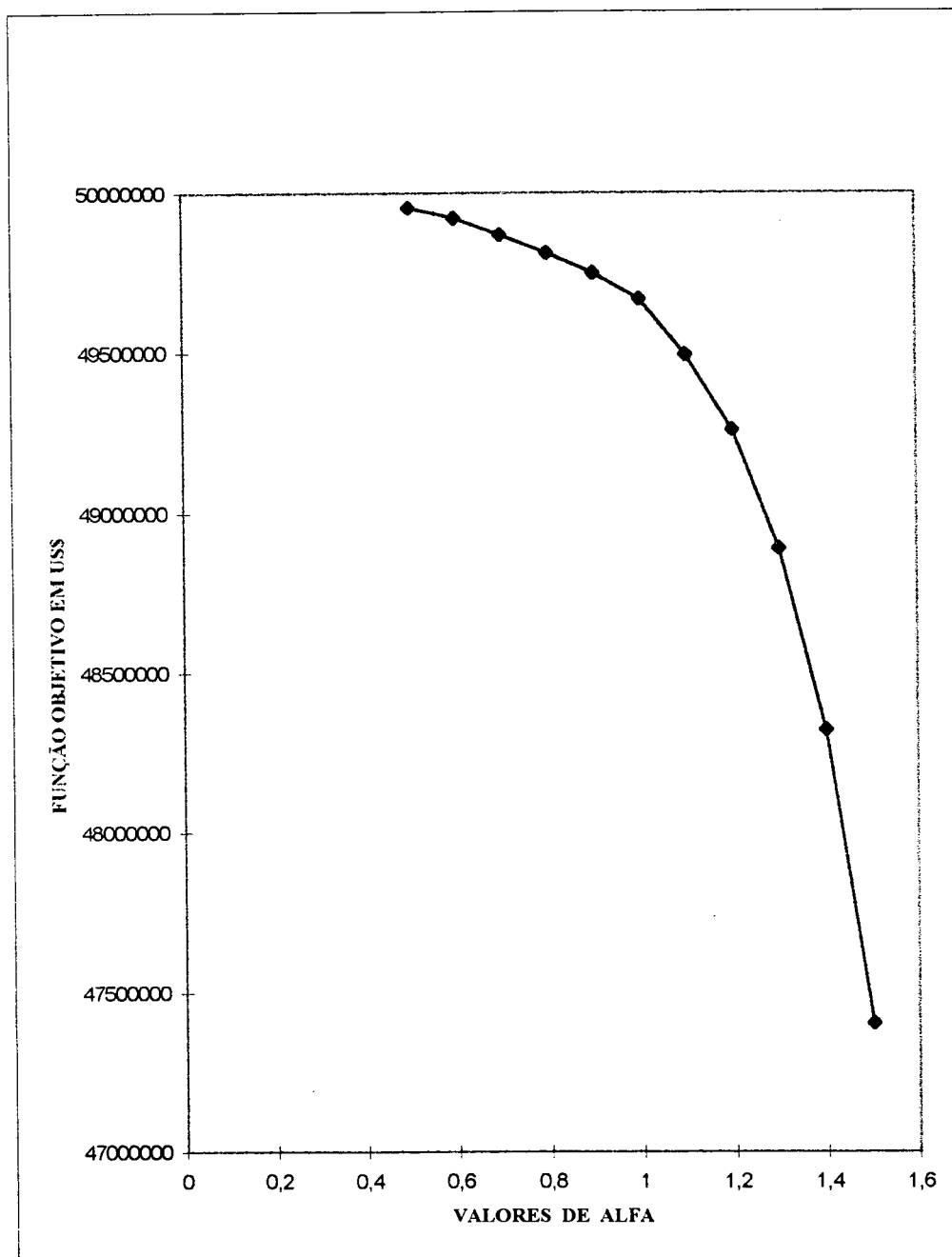
Foram executados cenários com quedas e aumentos sistemáticos nas demandas da forma  $D_{pert} = ALFA \cdot D_{lk}$  ; na Figura 26 está a representação gráfica dos valores encontrados.

Na Tabela 82 estão os valores de *FO* encontrados para cada valor de *ALFA*. Como se observa, as variações ocorrem a uma taxa muito pequena, porém bastante variável, sem linearidade.

TABELA 82: VALORES DE *FO* PARA VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NAS DEMANDAS DOS PRODUTOS

<i>ALFA</i>	Função Objetivo (US\$)	Diferença dos valores de <i>FO</i> (US\$)
0,5	49.954.297,00	33.982,00
0,6	49.920.315,00	51.940,00
0,7	49.868.375,00	57.212,00
0,8	49.811.163,00	61.957,00
0,9	49.749.206,00	81.734,00
1,0	49.667.472,00	172.087,00
1,1	49.495.385,00	236.383,00
1,2	49.259.002,00	369.311,00
1,3	48.889.691,00	567.353,00
1,4	48.322.338,00	917.773,00
1,5	47.404.565,00	

FIGURA 26: EFEITO NA FUNÇÃO OBJETIVO, DAS VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NAS DEMANDAS DOS PRODUTOS



#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO MODELO BÁSICO E OS DO MODELO PERTURBADO

##### 4.4.1 Em relação ao tamanho das amostras

Para um tamanho fixo de amostra  $n$ , confiança e precisão variam em sentidos opostos. O tamanho da amostra  $n$  com confiança  $(1-\alpha)$  e precisão  $e_0$  desejados, pode ser determinado

pela fórmula  $n = \left( \frac{t_{n_0-1, \alpha/2} \cdot s}{e_0} \right)^2$ , onde  $s$  é o desvio padrão da amostra piloto com tamanho

$n_0$ , de tal forma que  $P(\mu - e_0 \leq \bar{X} \leq \mu + e_0) = 1 - \alpha$ .

No que se refere ao tamanho da amostra usada em cada caso de simulação, foram feitas algumas considerações. Através da amostra piloto de 100 observações de valores de  $FO$ , foi calculado o tamanho mínimo da amostra necessária para se ter uma semi-amplitude de  $e_0 = LE \cdot \bar{X}$ , e um limite de erro  $LE$  de 10% em relação a média, usando a fórmula

$n = \left( \frac{t \cdot CV}{LE} \right)^2$ , com  $CV$  e  $LE$  em porcentagem. Para  $n=100$ , tem-se  $t=1,985$  e considerando

$LE=10\%$ , o tamanho mínimo da amostra é dado por  $n = 0,04 \cdot (CV\%)^2$ .

Os valores de  $n$  para cada situação estão na Tabela 83, sendo que o tamanho da amostra piloto, de 100 elementos, foi considerado satisfatório para todos os casos.

Foi feito um cálculo parcial dos coeficientes de variação para vários tamanhos de amostra de 20 até 100, para verificar a estabilização de seus valores. Os resultados estão na mesma tabela e mostram que existe uma tendência a estabilização em todos os casos.

Através das considerações anteriores, aceitou-se o tamanho da amostra piloto de 100, como suficiente para se fazer as análises e tirar as devidas conclusões.

TABELA 83: RESULTADOS PARCIAIS DE  $CV$  EM % E TAMANHO MÍNIMO DE AMOSTRA

Variável	Situação	Amostra 20	Amostra 40	Amostra 60	Amostra 80	Amostra piloto 100	Tamanho mínimo $n$
$a_{ij}$	$CV=10$	6,8	5,9	5,7	5,5	5,4	2
	$CV=20$	9,1	8,5	8,2	8,7	8,6	3
	$CV=30$	14,3	12,5	13,8	12,9	13,1	7
$a_{ij}$	$t=1/3$	7,3	7,9	7,2	6,9	6,9	2
	$t=1/2$	7,7	9,2	10,5	10,1	9,8	4
	$t=2/3$	16,0	14,3	14,8	13,9	13,7	8
$c_{ij}$	$CV=10$	4,4	3,6	3,6	3,6	3,6	1
	$CV=20$	6,9	7,0	7,2	7,2	7,2	3
	$CV=30$	11,1	9,9	10,3	10,8	10,6	5
$P_{lk}$	$CV=10$	15,4	15,2	13,8	13,1	13,4	8
	$CV=20$	25,2	26,8	25,8	25,5	25,9	27
	$CV=30$	27,6	29,5	30,2	30,0	29,6	35
$D_{lk}$	$CV=10$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1
	$CV=20$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	1
	$CV=30$	1,7	1,6	1,7	1,6	1,9	1

#### 4.4.2 Em relação à normalidade dos resultados

A Função Objetivo  $FO$  é uma função linear das variáveis de decisão  $x$ . Quando perturbamos os parâmetros preços ou custos considerando-os variáveis aleatórias, a  $FO$  que é uma soma de variáveis aleatórias normais, também é normal. Este fato deve-se ao resultado da estatística que diz que a combinação linear de variáveis aleatórias normais é normal. Apesar de que, no PL a Função Objetivo está sujeita a restrições, o resultado se manteve apesar das restrições, como observado através dos testes de normalidade efetuados para as simulações nos custos e preços.

Porém quando a perturbação ocorre na matriz tecnológica  $A$ , não existe teorema que garanta a normalidade dos valores de  $FO$ , apesar da perturbação ser normal. Segundo os testes feitos, o modelo normal se ajustou bem, mesmo quando a perturbação não é normal mas uniforme.

Nas perturbações no vetor de demandas, nenhuma amostra foi encontrada normal. Este resultado já era esperado pois não existe na teoria nada que justifique a situação de normalidade dos valores gerados.

#### 4.4.3 Em relação aos resultados

Através da Tabela 84 observam-se os coeficientes de variação encontrados para cada situação simulada.

Observa-se uma nítida diferença em cada situação, informando quais variáveis devem ser obtidas de forma mais cuidadosa.

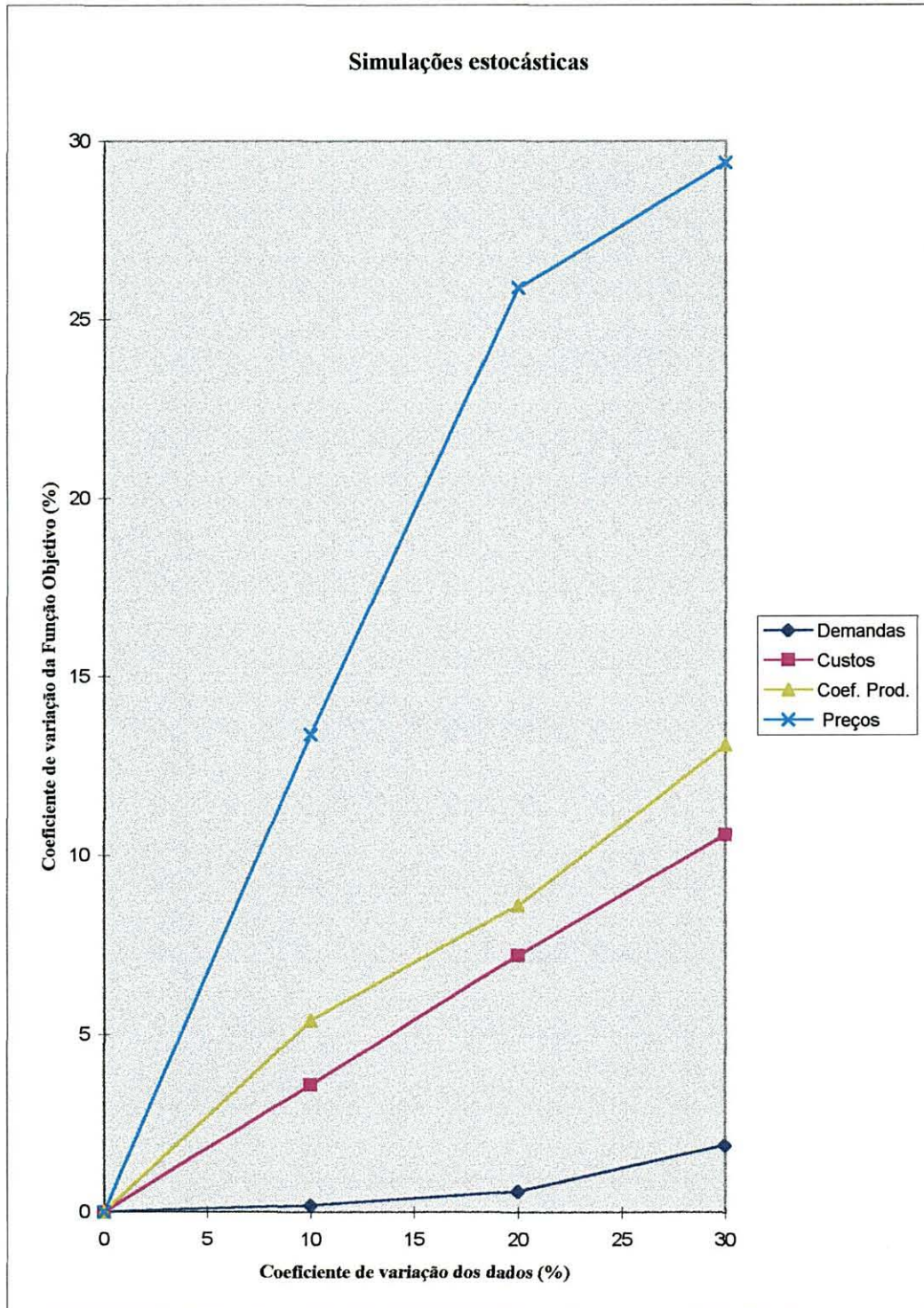
Graficamente estes resultados estão apresentados na Figura 27.

TABELA 84: COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DAS AMOSTRAS

	Objeto	$a_{ij}$ (%)	$c_{ij}$ (%)	$P_{ik}$ (%)	$D_{ik}$ (%)
SIMULAÇÃO NORMAL	$CV=10\%$	5,4	3,6	13,4	0,2
	$CV=20\%$	8,6	7,2	25,9	0,6
	$CV=30\%$	13,1	10,6	29,4	1,9
SIMULAÇÃO UNIFORME	$t=1/3$	6,9			
	$t=1/2$	9,8			
	$t=2/3$	13,7			

Os resultados das Funções Objetivos médias estão representadas na Figura 28, cujos valores estão na Tabela 85.

FIGURA 27 : RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA E OS VALORES DE *FO* OBTIDOS DAS SIMULAÇÕES



Verificou-se que apenas os valores médios da Função Objetivo para perturbações em coeficientes de produção (exceção  $CV=20\%$ ) e custos com  $CV=10\%$ , são estatisticamente iguais ao valor obtido no modelo básico.

TABELA 85: VALORES MÉDIOS DE  $FO$  EM US\$

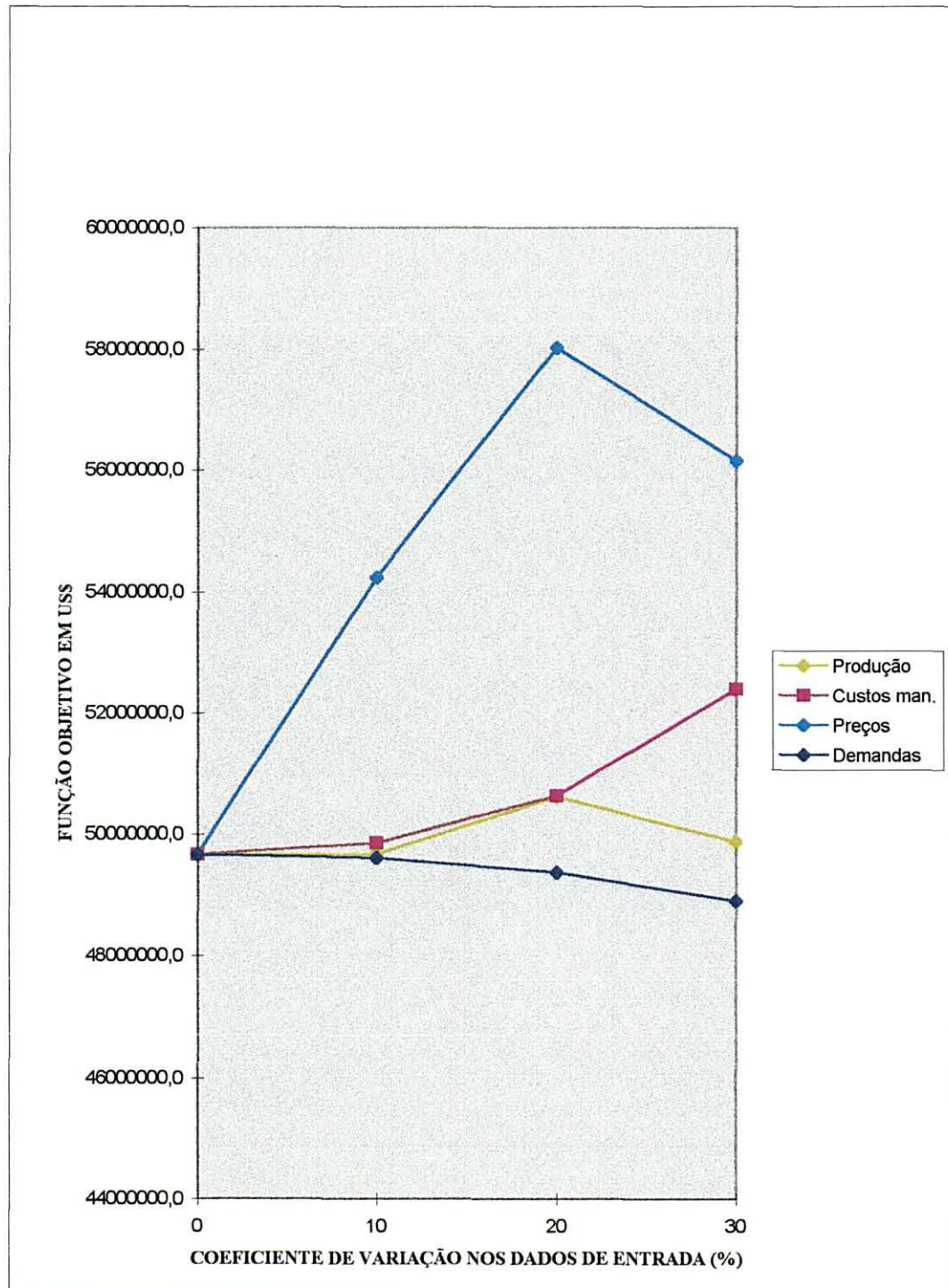
$CV$ dados (%)	Coef. de Produção (US\$)	Custos de manejo (US\$)	Preços (US\$)	Demandas (US\$)
0	49.667.472,20	49.667.472,20	49.667.472,20	49.667.472,20
10	49.682.040,90	49.864.072,20	54.239.250,20	49.610.100,70
20	50.624.533,60	50.639.818,80	58.040.424,80	49.379.116,40
30	49.892.906,80	52.404.269,00	56.161.026,80	48.913.795,40

Quando a perturbação ocorre nos dados de produção  $a_{ij}^{lk}$ , ocorre que a partir de um certo  $CV$ , a perturbação passa a interferir mais nas restrições, de forma que fica cada vez mais difícil satisfazê-las. Observe-se que a média de  $FO_{pert30}$  caiu em relação as outras médias das outras variações. Justifica-se este decréscimo ao fato de que, quando a perturbação é grande, pode-se chegar ao ponto de zerar algumas produções. Por exemplo, na situação de  $CV=30\%$ , tem-se  $a_{pert} = a_{ij}^{lk} + n \cdot a_{ij}^{lk} \cdot 0,3$ , onde  $n \in [-3, +3]$  com 99% de chance. Fazendo  $n = -3$ , tem-se  $a_{pert} = a_{ij}^{lk} - 3 \cdot a_{ij}^{lk} \cdot 0,3 = 0,1 \cdot a_{ij}^{lk}$ . Nestas situações, as restrições ficam mais difíceis de serem atendidas e devem ser atendidas de qualquer maneira; isto faz com que o valor da receita caia mais, do que quando os valores de produção crescem na mesma proporção.

Quando o  $CV$  é pequeno, não existem grandes perturbações nas restrições e esta interferência (decrécimo) na média de  $FO$  não é observada.



FIGURA 28: VALORES DAS FUNÇÕES OBJETIVOS MÉDIAS DE CADA AMOSTRA



O resultado de que em média a Função Objetivo tende a aumentar perante as perturbações é um bom resultado. Significa que, em média, não existe risco quando dados de produção, custos ou preços são perturbados. A única exceção que ocorreu foi com as perturbações nas demandas, porém o valor médio caiu muito pouco. Porém resta ainda a grande preocupação de que o projeto é executado apenas uma vez e apenas um resultado é obtido. Uma probabilidade de ocorrência associada a este valor é recomendável.

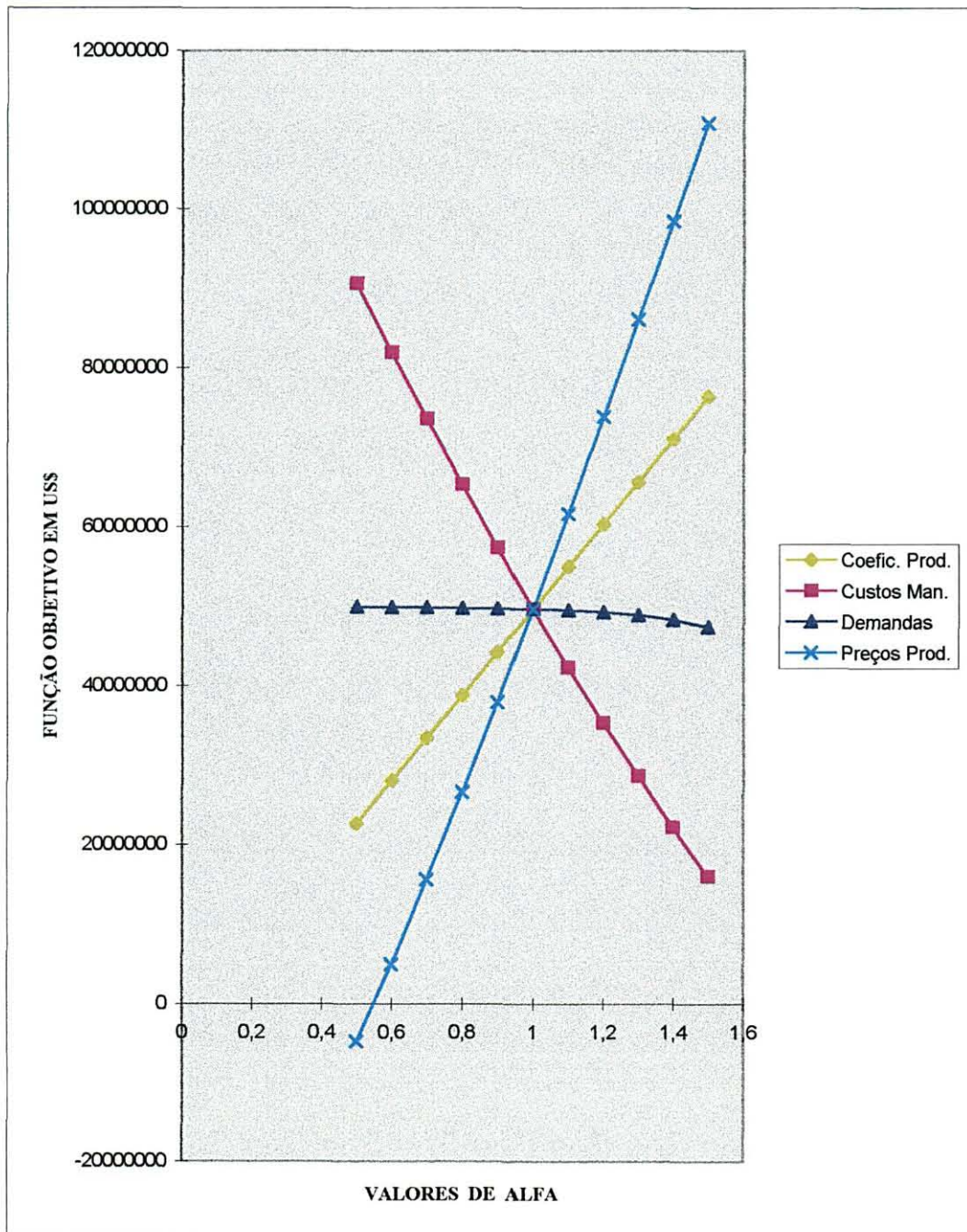
Na Tabela 86 estão os resultados das variações sistemáticas de todas as variáveis trabalhadas, como também sua representação gráfica na Figura 29.

Os limites de variação tem quase a mesma tendência dos resultados das simulações estocásticas. Para o mesmo nível de variação sistemática, as maiores variações em *FO* ocorrem quando são perturbados os preços, depois os custos de manejo, os coeficientes de produção e com quase nenhuma variabilidade, as demandas.

TABELA 86: VALORES DE *FO* (US\$) PARA VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS DADOS DE ENTRADA

<i>ALFA</i>	Coef. Produção	Custos manejo	Demandas	Preços
0,5	22.670.956,00	90.529.062,00	49.954.297,00	- 4.704.221,00
0,6	28.091.532,00	81.920.573,00	49.920.315,00	4.967.847,00
0,7	33.510.753,00	73.554.659,00	49.868.375,00	15.660.453,00
0,8	38.910.376,00	65.379.896,00	49.811.163,00	26.693.404,00
0,9	44.290.396,00	57.373.747,00	49.749.206,00	37.955.371,00
1,0	49.667.472,00	49.667.472,00	49.667.472,00	49.667.472,00
1,1	55.035.007,00	42.321.262,00	49.495.385,00	61.661.327,00
1,2	60.366.527,00	35.385.839,00	49.259.002,00	73.844.171,00
1,3	65.712.269,00	28.700.850,00	48.889.691,00	86.083.757,00
1,4	71.015.392,00	22.283.678,00	48.322.338,00	98.400.641,00
1,5	76.380.805,00	16.011.500,00	47.404.565,00	110.873.054,00

FIGURA 29: EFEITOS NA FUNÇÃO OBJETIVO DAS VARIAÇÕES SISTEMÁTICAS NOS COEFICIENTES DE PRODUÇÃO, CUSTOS DE MANEJO, DEMANDAS E PREÇOS DOS PRODUTOS



Nas simulações sistemáticas as variações ocorrem em todos os dados, no mesmo sentido, o que não acontece nas simulações estocásticas, quando aleatoriamente os valores são maiores ou menores que a média; por isso os valores de  $FO$  encontrados tendem a mudar mais, podendo até se tornar negativo, como no caso da queda dos valores de todos os preços de 50% em relação ao valor adotado no modelo básico.

#### Análise econômica dos coeficientes de variação encontrados

Na ausência de um conceito econômico específico para medir as variações da resposta do sistema, considerou-se **razão de variabilidade do coeficiente de produção do sistema** como sendo a medida de sensibilidade da resposta do sistema em relação a variações dadas aos coeficientes de produção. Definiu-se este como sendo a razão entre o coeficiente de variação da distribuição da resposta do sistema, o  $VLP$  da receita, e o coeficiente de variação da distribuição de entrada dos coeficientes de produção, conforme a equação  $\eta = \frac{CV\%_{FO}}{CV\%_{a_{ij}}}$ . Este

é um conceito pontual, análogo ao conceito econômico de elasticidade ponto ( $\varepsilon_p = \frac{X}{Y} \cdot \frac{\Delta Y}{\Delta X}$ , onde  $Y$  é o produto e  $X$  é o insumo, por exemplo). Esta razão pode assumir valores  $\eta > 1$ ,  $\eta < 1$  ou  $\eta = 1$ . Neste último caso, diz-se que o sistema é unitário.

O sistema é unitário se a perturbação dos dados com um determinado  $CV\%$  provoca respostas cuja distribuição possui igual valor de  $CV\%$ . Caso a variável de entrada seja representada por  $X$  e tenha uma distribuição com  $CV = \frac{s_X}{\bar{X}}$  e a variável de saída representada

por  $Y$  e  $CV = \frac{s_Y}{\bar{Y}}$  então  $\eta = \frac{\frac{s_Y}{\bar{Y}}}{\frac{s_X}{\bar{X}}} = \frac{s_Y}{s_X} \cdot \frac{\bar{X}}{\bar{Y}}$ .

Se  $\eta = 1$ , então  $\frac{S_X}{X} = \frac{S_Y}{Y}$ . Neste caso, a resposta do sistema é tão suscetível a

variações quanto as dadas nas variáveis de entrada.

Então pode-se reescrever a definição de  $\eta$  como sendo a suscetibilidade do sistema representado pela variação de  $FO$ , medido pelo  $CV\%$  da distribuição de saída, em relação às variações dadas em dados de entrada do sistema, medido pelo  $CV\%$  da distribuição de dados

considerada, isto é,  $\eta = \frac{CV\%_{FO}}{CV\%_{dados}}$ .

Quando  $\eta < 1$  indica que, o intervalo de variação dos valores que  $FO$  assume, proporcionalmente em relação a sua média, é menor do que o intervalo de variação da variável de entrada perturbada, proporcional ao seu valor médio. Quanto mais próximo de 0, menos suscetível está o sistema em relação a perturbações daquela variável.

Caso  $\eta > 1$  acontece o contrário, pois a variabilidade dos valores assumidos pelas receitas medida pelo seu  $CV$  é maior que o nível dado aos dados de entrada, significando que as receitas são altamente suscetíveis àquele dado perturbado. Quanto maior  $\eta$  maior será esta suscetibilidade.

Da mesma forma define-se **razão de variabilidade do custo de manejo do sistema, razão de variabilidade dos preços dos produtos do sistema e razão de variabilidade das demandas dos produtos do sistema.**

Foram analisadas variabilidades na  $FO$  (custos e preços), na matriz tecnológica (dados de produção) e no vetor dos recursos  $RHS$  (demandas obrigatórias). O sistema é mais suscetível a variações de preços, do que de dados de produção, do que de custos, do que em relação as demandas. Esses resultados podem ser observados nos valores de  $\eta$  encontrados para o estudo de caso, os quais se encontram na Tabela 87.

A influência dos preços na  $FO$  é bem maior que a dos custos, apesar de ambos influenciarem diretamente no cálculo da  $FO$ . Isto se observa pelo seguinte:

- Sejam  $RL_1$ : receita líquida,  $RB$ : receita bruta e  $C$ : custos.
- Supondo que  $RL_1 = RB - C$  e diminuindo de 10% os custos, a nova receita líquida é de  $RL_2 = RB - 0,9.C = RL_1 + 0,1.C$ ; a função aumenta de uma quantidade 10% de  $C$ . Aumentando de 10% os preços, tem-se que  $RL_3 = 1,1.RB - C = 0,1.RB + RL_1$ , isto é, a receita líquida aumenta de 10% da receita bruta em relação à receita original.
- Se  $RB > |C|$ , então o aumento proporcional na  $RL$  é maior quando o preço aumenta do que quando o custo cai da mesma proporção.

TABELA 87: VALORES DE  $\eta$  - RAZÃO DE VARIABILIDADE DO OBJETO DO SISTEMA.

Objeto	CV dos dados de entrada	CV dos dados de saída	$\eta$ - RAZÃO DE VARIABILIDADE
Coeficiente de Produção	10	5,4	0,54
	20	8,6	0,43
	30	13,1	0,44
Custos de manejo	10	3,6	0,36
	20	7,2	0,36
	30	10,6	0,35
Preços dos produtos	10	13,4	1,34
	20	25,9	1,30
	30	29,4	0,98
Demandas dos Produtos	10	0,2	0,02
	20	0,6	0,03
	30	1,9	0,06

## 4.5 DISCUSSÃO GERAL

### 4.5.1 Em relação à metodologia proposta

O uso de modelos determinísticos de PL já está bastante disseminado na área de planejamento florestal, como também o uso de simulações, principalmente no estudo de funções de crescimento e produção. Porém, o uso de simulações em modelos de PL é uma abordagem nova e uma das formas que foi encontrada para analisar a estabilidade do modelo frente a variações de dados de entrada.

Comparando com outras formas de resolução em problemas envolvendo incerteza nos dados, tais como as técnicas de restrições probabilísticas ou ‘chance-constrained’, onde procura-se a solução que atenda as restrições com uma certa probabilidade, este método evita que técnicas de PNL sejam necessárias na resolução, cujos algoritmos não tem a mesma aplicabilidade e facilidade do Simplex.

A grande vantagem desta abordagem, o uso de simulação em modelos de Programação Linear, é justamente fornecer ao gerente de decisões uma distribuição de valores das receitas onde a cada resultado está associado à probabilidade de obtê-lo.

Na prática, os valores esperados devem ser usados no modelo, pois a informação pontual dada por  $FO_{\text{básico}}$  é importante. Se o analista está confiante que os coeficientes de produção, os preços, os custos e demandas dos produtos estão próximos dos valores esperados, então este estudo sugere que o valor ótimo de  $FO$ , associado àqueles valores, está perto do valor esperado do ótimo do valor da função objetivo.

Este estudo também mostrou algumas implicações da prática corrente, caracterizada pela consideração dos dados como determinísticos.

Quando a estocasticidade se apresenta apenas na  $FO$ , esta prática é equivalente a maximizar o valor esperado da  $FO$ , isto é,  $\max E(FO)$ , que não é equivalente a  $E(\max FO)$ . Esta situação ocorre quando são perturbados os custos de manejo e os preços dos produtos. Nestes dois casos ocorreu que  $E(\max FO) \geq \max E(FO)$ . Apenas no caso de  $CV=10\%$ , nos dados dos custos é que se observou igualdade estatística, a nível de 95%; nos demais casos os valores esperados encontrados,  $E(\max FO)$ , foram sempre maiores.

Quando a estocasticidade se apresenta nas restrições, o valor  $\max E(FO)$  é indeterminado, no sentido de que não pode-se encontrar uma solução factível para toda  $A$  estocástica. Porém,  $E(\max FO)$  para  $A$  estocástica é determinado, a princípio com nenhuma solução conhecida associada a este valor esperado. Para o estudo de caso foi encontrado  $E(\max FO) \geq \max E(FO)$ . Esta situação ocorre quando são perturbados os coeficientes de produção, sendo a matriz  $A$  estocástica. Neste caso obteve-se  $E(\max FO) = \max E(FO)$ , isto é, os valores encontrados foram estatisticamente iguais para os coeficientes de variação de 10 e 30%.

Quando a estocasticidade se apresenta no vetor dos recursos (ou demandas), encontraram-se valores tais que  $E(\max FO) < \max E(FO)$ , sendo que nos 3 casos testados para perturbação nas demandas com  $CV=10, 20$  e  $30\%$ , os valores esperados foram todos estatisticamente diferentes dos máximos valores esperados de  $FO$ .

Este estudo de caso indica que a Falácia das Médias, que diz que não se pode esperar a igualdade  $E(\max FO) = \max E(FO)$ , pode não ser grande para algumas situações, como por exemplo para o caso dos coeficientes de produção, mas pode ser significativamente maior como é o caso de preços dos produtos onde  $E(\max FO) \gg \max E(FO)$ , como por exemplo para a situação de  $CV=30\%$ .



Sendo este estudo de caso representativo, a prática corrente de usar valores esperados pode gerar valores de  $\max E(FO)$  aproximados ou afastados com risco, do valor  $E(\max FO)$ , dependendo de onde ocorra a substituição dos valores esperados. O mais indicado é trabalhar com a distribuição das soluções, que mostra os valores máximos e mínimos de  $FO$ , com suas respectivas probabilidades de ocorrência. Além disto, o tratamento de PL + simulação, amplia a visão dos valores que a receita pode assumir frente às possíveis variabilidades passadas e futuras dos dados.

O simulador desenvolvido além de simular estas situações de risco, também permite fazer testes com qualquer cenário futuro, alterando preços, demandas, custos e outros, individualmente ou concomitantemente.

#### 4.5.2 Em relação ao modelo básico

O modelo atendeu as restrições mais imediatas que uma empresa florestal tem a níveis físicos e operacionais, tais como restrições de área, demandas e volume de exploração.

Poderiam ter sido usados outros tipos de restrições além destas, tais como restrições de continuidade de corte, restrições orçamentárias, restrições de exploração de uma determinada espécie. Porém, procurou-se considerar um mínimo necessário de restrições, de forma que as mesmas não interferissem nas análises dos resultados das simulações, já que o objetivo principal era a análise da variabilidade.

#### 4.5.3 Em relação ao estudo de caso

Foi considerada uma gama de variação mínima em termos de espécie, sítio, região de exploração e área, que representasse uma empresa florestal média.

Foram feitos testes anteriores para uma situação com menos estratos e o grau de variabilidade dos resultados foi do mesmo nível.

Quanto à escolha do regime 6 (8-12-25) como sendo o regime preferencial, justifica-se pelo fato que neste regime além da madeira para processo, outros produtos mais nobres foram contemplados em maior quantidade. Em rotações mais longas, como esta de 25 anos, as árvores ficam com dimensões maiores, sendo mais valorizadas em função dos produtos gerados, o que não acontece em rotações mais curtas, as quais agregam menos valor econômico.

Observou-se na análise das receitas de cada regime, de que muitos deles têm um custo muito alto, tanto de implantação quanto de exploração, inviabilizando-os, tais como os regimes *pulpwood*, cujo principal objetivo é madeira para processo. A receita advinda do regime *pulpwood*, só considerou o valor da tora e não a sua utilização na indústria de papel.

Os regimes passam a ter um valor esperado melhor quando a eles estão associados outros produtos mais rentáveis do que simplesmente a madeira para processo, tais como laminados e madeira para serraria, com mais ênfase nos podados.

#### 4.5.4 Considerações gerais

Sempre houve uma preocupação em relação aos possíveis valores que a *FO* poderia assumir frente à variabilidade dos dados. Devido às dificuldades computacionais inerentes ao problema, não apareceram na literatura brasileira trabalhos que contribuíssem para responder tal questão. Hoje, como essas dificuldades foram ultrapassadas com a crescente velocidade de execução dos PC's, foi possível abordar o problema e a análise estocástica permitiu quantificar a estabilidade da solução do sistema perante as perturbações em dados que alimentam o modelo. Observe-se que esta metodologia poderia ter sido aplicada em qualquer outro modelo.

No estudo de caso, observou-se que alguns dados interferem mais que outros no valor final de  $FO$ , informando ao empresário onde ele deve tomar mais cuidado em termos de informação ou onde ele deve buscar a informação adicional, quando possível. Algumas alternativas podem ser consideradas, caso os dados que alimentam o modelo não sejam deterministicamente conhecidos.

Primeiro deve-se examinar as possíveis variabilidades e determinar a sua magnitude, isto é, o que varia e de quanto varia, para depois determinar quais considerações devem ser feitas em relação a essas variabilidades durante o processo de otimização.

Se nas análises, as variações dos coeficientes e dados são pequenas ou fazendo pequenas variações no modelo observa-se que os efeitos na  $FO$ , na produção total e escolhas de manejo são pequenos, pode-se considerar o problema determinístico e usar a média ou a estimativa do valor esperado dos coeficientes e considerar o valor esperado da receita como ótimo.

Caso observe-se que a variabilidade só ocorre na  $FO$ , ou no  $RHS$ , uma análise paramétrica linear pode ser efetuada. Observe-se aqui que apenas um grupo de elementos pode ser alterado e de forma linear, o que implicaria que esta análise só tem sentido quando apenas um grupo de variáveis variam.

Se a variação ocorrer em vários elementos, ou na  $FO$ , ou nas restrições ( $RHS$  e matriz tecnológica), o procedimento de usar simulações no modelo de PL mostrou-se adequado para analisar o domínio de variabilidade da  $FO$ , pois a distribuição encontrada define os valores possíveis que a  $FO$  pode assumir e a probabilidade de ocorrência deles.

Às vezes é difícil para os gerentes julgarem a probabilidade dos eventos incertos. Por exemplo, pode-se desconfiar que os coeficientes de produção não estão corretos, mas não se pode dizer a que nível ocorre esta perturbação, se em torno de  $CV=10\%$  ou  $50\%$ . Neste caso,

sugere-se fazer uma avaliação da variabilidade, através de medições no campo, para formar um banco de dados para estudos e consulta.

Alguns riscos podem ser reduzidos com informação adicional. O valor desta informação deve ser usado.

Outros riscos não podem ser resolvidos por obtenção de melhores dados, pois dependem de informações futuras, tais como preços e mercado futuro e também de ocorrências de catástrofes, como incêndios e pragas, que geram redução nos dados de produção. Pelos resultados da razão de variabilidade, no presente caso verificou-se que os preços foram os responsáveis pelas maiores variações nos valores de *FO*. Na tomada de decisões essa observação é relevante e deve ser considerada quando na análise dos resultados do modelo.

Os valores da razão de variabilidade  $\eta$  podem ser usados para critério de decisão em subsídios aos incentivos do governo na área florestal. No estudo de caso, mostrou-se que o preço é o melhor incentivo e não o subsídio no custo.

Como um certo grau de risco é inevitável em projetos grandes, estes devem ser planejados à possibilidade de modificações e trocas, isto é, preparar o projeto de uma forma mais flexível possível e depois fazer uso do simulador para se ter uma visão ampla das respostas do sistema.

Outra consideração que pode ser feita é que, felizmente, quando um modelo é utilizado ele nunca é executado apenas uma vez e daí tomadas as decisões para todo o horizonte de planejamento. Ele é executado primeiramente com os melhores dados disponíveis para a tomada das primeiras decisões; conforme mais informações são incorporadas ao processo, uma realimentação dos dados no sistema é necessária, reduzindo o risco na informação inicial e na resposta do sistema dada pela distribuição de *FO*.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento deste trabalho, seguem-se as conclusões mais importantes:

- (1) O sistema computacional desenvolvido para efetuar as simulações estocásticas e representar cenários sistemáticos, mostrou-se adequado ao seu propósito de gerar os valores de  $FO$  que a receita assumiria em várias situações reais. A partir destes valores foi possível analisar e quantificar o impacto que as variáveis aleatórias podem causar na resposta do sistema.
- (2) A abordagem de usar simulações estocásticas em um modelo de PL, constituiu-se uma técnica adequada para medir o risco na tomada de decisões num planejamento florestal, já que oferece ao gerente florestal uma distribuição de valores das receitas associadas à probabilidade de obtê-las. Esta é a grande vantagem sobre o enfoque determinístico, que usa valores esperados das variáveis aleatórias que alimentam o modelo e que apresenta um único valor para a receita.
- (3) Através da distribuição dos valores de  $FO$ , pode-se obter  $E(\max FO)$ , que é uma estimativa média das receitas, quando têm-se variáveis aleatórias no modelo.
- (4) Através da análise de risco obtida pelos coeficientes de variação  $CV$  das distribuições das resposta do sistema, conclui-se que a variável preço oferece o maior risco ao empreendimento, seguido pelos coeficientes de produção, depois custos de manejo e daí pelas demandas dos produtos.
- (5) Comparando os valores da  $FO_{\text{básico}}$  obtido no enfoque determinístico, com os valores médios obtidos em cada situação simulada (coeficientes de produção, custos de manejo,

preços e demandas dos produtos), conclui-se que estes valores são significativamente diferentes do valor  $FO_{\text{básico}}$ , com exceção quando os coeficientes de produção são perturbados e em pequenas perturbações nos custos. Nos demais casos o valor médio pode ser maior (caso das perturbações nos custos e preços) ou menor (caso das perturbações nas demandas) que o valor  $FO_{\text{básico}}$  da situação determinística considerada .

- (6) O regime de manejo 6 (8-12-25), mostrou-se o mais eficiente dentro do processo de otimização para a maioria dos estratos, já que o mesmo agrega maior valor econômico, devido aos produtos mais nobres que são obtidos pela rotação mais longa.
- (7) O conceito introduzido de razão de variabilidade  $\eta$  mostrou-se útil para identificar as variáveis de maior influência no modelo, merecendo por isso prioridade na análise do mesmo.
- (8) O modelo básico considerou as possibilidades reais de compra de madeira para processo e venda dos 10 produtos, que é uma realidade em algumas empresas florestais.
- (9) As simulações podem ser feitas automaticamente, sem interferência do operador do sistema.
- (10) Este trabalho mostrou que é possível considerar muitos produtos florestais de uma forma consistente em um modelo de Programação Linear.
- (11) A metodologia usada neste trabalho pode ser aplicada em qualquer modelo de Programação Linear, sendo que seu emprego é útil na área florestal devido à sua especificidade de trabalhar em ambiente estocástico, mostrando-se um instrumento de auxílio na tomada de decisões em planejamento florestal.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se o uso desta abordagem após o julgamento da fonte de erro e do grau de desconhecimento que se tem das variáveis. Em seguida sugere-se o uso das simulações para agregar às outras informações existentes, como suporte do processo de planejamento florestal.

Medir risco ou fazer uma avaliação dele não é suficiente; risco tem que ser reduzido e controlado. Às vezes o custo para tal é muito alto, por isso a resposta do sistema representa um compromisso entre o risco que se quer assumir e o valor esperado da receita.

Serão feitas algumas recomendações em relação a trabalhos futuros com o objetivo de ampliar a discussão em relação ao problema, tais como:

- (1) Ampliar o número de regimes oferecidos, flexibilizando idades de corte, pois além de contribuir para a regulação da floresta, também tende a melhorar o valor da receita. O número de regimes tem que ser tal que não inviabilize operacionalmente o empreendimento.
- (2) Usar simulador de produções adequado a cada empresa. Se for utilizado o SISPINUS, este deve ser alimentado com as informações provenientes dos dados da empresa, tais como a sua classificação de sítio, suas funções de crescimento e de produção.
- (3) Incorporar um simulador de produções ao próprio simulador de receitas estocásticas, pois isto agilizará o tempo computacional de processamento dos dados.
- (4) Considerar níveis de juro que sejam variáveis, a partir dos 6% ao ano usados no modelo. Os modelos de planejamento no manejo florestal envolvem horizontes longos com risco crescente; o juro variável pode embutir este cenário.
- (5) Analisar variabilidade nas decisões das variáveis de manejo, quando feitas as perturbações. Guardando-se os valores aleatorizados dos coeficientes de produção ou outra qualquer variável perturbada, pode-se fazer uma avaliação do comportamento das variáveis de decisão, através de uma análise estatística dos resultados.

- (6) Simular situações de variabilidade de mais de um grupo de dados ao mesmo tempo, já que pode haver situações onde ocorra tal cenário.
- (7) Procurar o máximo de informações históricas dos dados, guardando-os em bancos de dados para uso, pois a confiabilidade dos resultados depende em grande parte do conhecimento dos dados que alimentam o modelo.
- (8) Fazer estudos futuros, quanto a preços e tendências de mercado, porque a informação do preço é a que mais influencia o valor de  $FO$ , seguida dos coeficientes de produção e depois dos custos de manejo. Na realidade um grande investimento deve ser feito no inventário e no modelo de produção.
- (9) Incorporar outros tipos de restrições tais como: restrições de continuidade de corte, restrições de produções máximas dos produtos, restrições de regularidade, entre outras.
- (10) Analisar os problemas de escala que ocorrem nos preços de compra e venda dos produtos e nos custos de manejo .
- (11) Considerar outros objetivos no modelo além dos econômicos, tais como os sociais e ambientais, os quais também podem ser incorporados nas restrições.
- (12) Usar períodos de planejamento de magnitudes diferentes: anuais, no início quando mais informações são necessárias e agrupados (mais de um ano), a partir, por exemplo do 15º ano de planejamento.
- (13) Desenvolver um planejamento vertical, envolvendo a indústria de papel.
- (14) Utilizar outras distribuições probabilísticas nas perturbações das variáveis, além da normal e uniforme já testadas.
- (15) Analisar a influência na receita advinda dos estratos podados.
- (16) No programa de cálculo de custos de manejo, considerar classes de declividade, já que estes custos também são altos.



**ANEXOS:****ANEXO 1:**

Valores das áreas em hectares, dos 80 estratos considerados no modelo básico, na mesma ordem em que foram trabalhados em todos os programas.

**ARQUIVO:AREA2.FOR**

82.7

118

9

235.4

319.8

60.7

48.2

47

22.8

323.2

42.8

10.2

67

107.7

73.8

73.8

161

164.7

138.5

397.7

287

249

36.5

115.4

12.6

72.1

171.3

32.6

12.5

32.9

89.6

392.2

198.9

55.1

227.8

419.6

175.3

142.6

289.4

443.6  
67.1  
32.1  
38.9  
20.7  
68.1  
75.6  
148.5  
357.7  
60.8  
23.6  
118.4  
583.2  
117.7  
391  
137.2  
94.8  
114.6  
93.7  
329.4  
296.9  
123.1  
248.9  
92.6  
426.8  
159.4  
294.2  
11  
514.1  
310.7  
87.5  
329.2  
79.4  
228.9  
228.9  
218.8  
7.5  
49.6  
7.9  
42.6  
125.3

## ANEXO 2:

Neste arquivo estão as informações dos 80 estratos considerados no modelo básico, na ordem em que eles aparecem em todos os outros arquivos.

As informações, por coluna são:

Coluna 1: idade do estrato.

Coluna 2: característica de ser podado ou não.

Coluna 3: índice de sítio.

Coluna 4: densidade de plantio.

Coluna 5: espécie considerada.

Coluna 6: região considerada.

Coluna 7: idade da primeira poda, quando houver.

## ARQUIVO: ESTRATO2.FOR

```

9  1  1  1  1  2  3
6  1  2  1  1  4  4
6  1  3  1  1  2  3
7  1  3  1  1  4  4
7  1  3  1  1  4  5
7  1  3  1  1  5  4
7  1  4  1  1  1  4
8  1  4  1  1  4  4
8  1  4  1  1  4  5
8  1  4  1  1  4  4
22 0  1  1  1  2  0
22 0  1  1  1  2  0
24 0  1  1  1  2  0
24 0  1  1  1  2  0
  2  0  2  1  1  2  0
22 0  2  1  1  2  0
23 0  2  1  1  2  0
23 0  2  1  1  2  0
24 0  2  1  1  2  0
  0  0  2  1  1  2  0
  0  0  2  1  1  2  0
  1  0  2  1  1  2  0
18 0  1  2  1  2  0
18 0  1  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
18 0  2  2  1  2  0
23 0  1  1  1  1  0
23 0  2  1  1  1  0
24 0  2  1  1  1  0

```

3 0 3 1 1 1 0  
4 0 3 1 1 1 0  
4 0 3 1 1 1 0  
4 0 3 1 1 1 0  
4 0 3 1 1 1 0  
5 0 3 1 1 1 0  
5 0 3 1 1 1 0  
20 0 1 2 1 1 0  
21 0 1 2 1 1 0  
17 0 2 2 1 1 0  
19 0 2 2 1 1 0  
19 0 2 2 1 1 0  
17 0 3 2 1 1 0  
19 0 3 2 1 1 0  
22 0 3 2 1 1 0  
7 0 4 2 1 1 0  
19 0 4 2 1 1 0  
0 0 3 1 1 3 0  
1 0 3 1 1 3 0  
3 0 3 1 1 3 0  
4 0 3 1 1 3 0  
4 0 3 1 1 3 0  
5 0 3 1 1 3 0  
5 0 3 1 1 3 0  
5 0 3 1 1 3 0  
6 0 3 1 1 3 0  
7 0 3 1 1 3 0  
3 0 3 1 1 4 0  
4 0 3 1 1 4 0  
5 0 3 1 1 4 0  
6 0 3 1 1 4 0  
7 0 3 1 1 4 0  
8 0 3 1 1 4 0  
19 0 3 1 1 4 0  
7 0 4 1 1 4 0  
8 0 2 1 1 4 0  
19 0 1 1 1 4 0  
16 0 2 1 1 5 0  
1 0 3 1 1 5 0  
5 0 3 1 1 5 0  
5 0 3 1 1 5 0  
3 0 3 1 1 5 0  
7 0 3 1 1 5 0  
1 0 3 1 1 5 0  
17 0 4 1 1 5 0  
6 0 4 1 1 5 0  
6 0 4 1 1 5 0

## ANEXO 3:

Neste arquivo estão as informações de quais dos 11 regimes atuam em cada um dos 80 estratos, além da idade de cada um, na primeira coluna.

ARQUIVO : ESC20.for

```

9  0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
6  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
6  0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
7  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
7  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
7  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
7  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
8  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
8  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
8  0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
22 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
22 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
24 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
24 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
2  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
22 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
23 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
23 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
24 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
1  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
18 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
23 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
23 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
24 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
3  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5  1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
20 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0

```

21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
17	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
17	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
16	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
17	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

## ANEXO 4:

Neste arquivo estão as informações do valor líquido presente dos custos de manejo dos 80 estratos considerados no modelo básico, para cada um dos 11 regimes que atuam neles. Em cada linha estão representados os custos para cada estrato, na mesma ordem em que eles são trabalhados em todos os programas.

## ARQUIVO: CUSTO22.FOR

.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-7001.9	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-7919.8	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-4192.3	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-6717.3	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-6926.9
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-5661.6	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-3830.5	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-5543.6	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-5783.9
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-5543.6	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-13296.9	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-13296.9	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-14966.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-14966.7	.0	.0	.0	.0
-6317.4	-6545.4	-6732.3	-5322.0	-4810.1	-4744.9	-5092.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-11348.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-12008.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-12008.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-12777.6	.0	.0	.0	.0
-6051.9	-6208.0	-4943.3	-4899.5	-4707.0	-4649.0	-4958.6	.0	.0	.0	.0
-6051.9	-6208.0	-4943.3	-4899.5	-4707.0	-4649.0	-4958.6	.0	.0	.0	.0
-6027.1	-6192.7	-6432.7	-5093.7	-4610.7	-4549.3	-4877.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-11438.4	-11433.9	-9091.5	-11480.1	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-11438.4	-11433.9	-9091.5	-11480.1	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9705.4	-9700.7	-7799.9	-9703.8	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-14748.2	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-12590.1	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-13371.5	.0	.0	.0	.0
-5593.1	-5868.1	-6055.5	-4772.2	-4526.8	-4300.0	-4531.3	.0	.0	.0	.0
-5933.6	-6225.1	-6453.8	-5057.6	-4797.4	-4681.2	-5080.8	.0	.0	.0	.0
-5933.6	-6225.1	-6453.8	-5057.6	-4797.4	-4681.2	-5080.8	.0	.0	.0	.0
-5933.6	-6225.1	-6453.8	-5057.6	-4797.4	-4681.2	-5080.8	.0	.0	.0	.0
-5933.6	-6225.1	-6453.8	-5057.6	-4797.4	-4681.2	-5080.8	.0	.0	.0	.0
-6194.1	-6495.3	-6730.3	-5552.6	-4952.5	-4806.0	-5252.9	.0	.0	.0	.0
-6194.1	-6495.3	-6730.3	-5552.6	-4952.5	-4806.0	-5252.9	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-10629.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	-13212.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-9500.2	-9536.0	-7707.9	-9520.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-10628.9	-10669.1	-8617.9	-10651.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-10628.9	-10669.1	-8617.9	-10651.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-7916.8	-7886.8	-6466.7	-7914.1	.0	.0	.0	.0

.0	.0	.0	-8849.8	-8816.1	-7223.2	-8846.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	-10025.2	.0	.0	.0	.0	.0
-5974.8	-6380.5	-6561.2	-5190.7	-4573.5	-4469.5	-4872.1	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-7166.7	-7124.1	-5923.2	-7127.8	.0	.0	.0	.0
-4122.8	-4249.2	-3428.6	-3396.2	-3270.3	-3242.6	-3417.7	.0	.0	.0	.0
-4111.3	-4245.3	-4384.7	-3526.7	-3217.3	-3187.9	-3373.5	.0	.0	.0	.0
-4457.4	-4639.8	-4748.6	-3804.4	-3639.9	-3423.8	-3632.3	.0	.0	.0	.0
-4729.7	-4923.1	-5068.5	-4032.2	-3857.8	-3728.0	-4061.8	.0	.0	.0	.0
-4729.7	-4923.1	-5068.5	-4032.2	-3857.8	-3728.0	-4061.8	.0	.0	.0	.0
-4912.6	-5109.3	-5255.5	-4378.5	-3948.9	-3786.7	-4165.2	.0	.0	.0	.0
-4912.6	-5109.3	-5255.5	-4378.5	-3948.9	-3786.7	-4165.2	.0	.0	.0	.0
-4912.6	-5109.3	-5255.5	-4378.5	-3948.9	-3786.7	-4165.2	.0	.0	.0	.0
-5174.3	-5393.2	-5545.5	-4599.2	-4143.8	-3963.3	-4373.0	.0	.0	.0	.0
-5451.9	-5681.3	-5840.2	-4836.0	-4353.3	-4154.0	-4596.3	.0	.0	.0	.0
-8062.9	-8533.0	-8868.3	-6851.3	-6425.5	-6199.2	-6473.6	.0	.0	.0	.0
-8563.2	-9061.5	-9468.2	-7263.5	-6812.1	-6740.0	-7264.8	.0	.0	.0	.0
-8959.6	-9478.2	-9900.2	-8009.2	-7057.7	-6952.6	-7537.6	.0	.0	.0	.0
-9458.5	-10029.7	-10473.9	-8440.8	-7432.3	-7311.0	-7940.9	.0	.0	.0	.0
-9987.8	-10590.2	-11058.0	-8901.8	-7832.7	-7694.9	-8371.9	.0	.0	.0	.0
-10562.3	-11188.4	-11706.4	-9393.6	.0	.0	-8831.9	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-12876.8	-12775.6	-10676.0	-12837.2	.0	.0	.0	.0
-7817.8	-8413.4	-8761.2	-6910.4	-6107.1	-6067.3	-6508.6	.0	.0	.0	.0
-13133.9	-13762.6	-14419.0	-11725.1	.0	.0	-11092.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-19035.5	-19059.7	-15559.2	-19041.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-10559.5	-10627.8	-8505.0	-10612.0	.0	.0	.0	.0
-6300.2	-6536.2	-6766.3	-5363.4	-4854.3	-4826.7	-5109.4	.0	.0	.0	.0
-7537.5	-7863.0	-8109.2	-6677.8	-5969.4	-5746.2	-6323.6	.0	.0	.0	.0
-7537.5	-7863.0	-8109.2	-6677.8	-5969.4	-5746.2	-6323.6	.0	.0	.0	.0
-6792.4	-7090.2	-7288.0	-5733.7	-5450.7	-5130.6	-5448.3	.0	.0	.0	.0
-8393.7	-8779.4	-9050.0	-7410.4	-6614.5	-6344.8	-7012.4	.0	.0	.0	.0
-6300.2	-6536.2	-6766.3	-5363.4	-4854.3	-4826.7	-5109.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-7591.5	-7596.7	-6260.5	-7617.8	.0	.0	.0	.0
-6412.9	-6819.5	-7017.6	-5623.2	-5034.8	-4897.2	-5337.8	.0	.0	.0	.0
-6412.9	-6819.5	-7017.6	-5623.2	-5034.8	-4897.2	-5337.8	.0	.0	.0	.0



## ANEXO 5:

Neste arquivo estão as informações do valor líquido presente dos valores terminais dos 80 estratos considerados no modelo básico, associados a cada um dos 11 regimes que atuam neles. Em cada linha estão representados os valores terminais para cada estrato, na mesma ordem em que eles são trabalhados em todos os programas.

## ARQUIVO: VT.FOR

.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	5041.7	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	3514.6	.0	2333.9
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1596.6	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	2565.5	.0	1869.9
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	861.3	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	2824.1	.0	2065.3
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1861.7	.0	1352.7
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1328.5	.0	945.5
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-55.6	.0
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1328.5	.0	945.5
.0	.0	.0	.0	.0	93.1	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	93.1	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	568.9	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	568.9	.0	.0	.0	.0	.0
458.2	394.6	63.3	880.7	880.7	533.6	880.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	63.3	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	359.7	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	359.7	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	394.6	.0	.0	.0	.0	.0
394.6	63.3	1232.4	767.1	767.1	458.2	767.1	.0	.0	.0	.0
394.6	63.3	1232.4	767.1	767.1	458.2	767.1	.0	.0	.0	.0
430.9	359.7	1315.5	822.2	822.2	494.8	822.2	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	753.6	753.6	2778.4	753.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	753.6	753.6	2778.4	753.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	533.6	533.6	2054.6	533.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	533.6	533.6	2054.6	533.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	533.6	533.6	2054.6	533.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	533.6	533.6	2054.6	533.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	533.6	533.6	2054.6	533.6	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	651.9	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	408.9	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	446.9	.0	.0	.0	.0	.0
282.0	241.6	191.1	723.3	723.3	335.7	723.3	.0	.0	.0	.0
308.1	257.4	216.0	775.8	775.8	439.9	775.8	.0	.0	.0	.0
308.1	257.4	216.0	775.8	775.8	439.9	775.8	.0	.0	.0	.0
308.1	257.4	216.0	775.8	775.8	439.9	775.8	.0	.0	.0	.0
308.1	257.4	216.0	775.8	775.8	439.9	775.8	.0	.0	.0	.0
335.7	282.0	241.6	831.4	831.4	475.5	831.4	.0	.0	.0	.0
335.7	282.0	241.6	831.4	831.4	475.5	831.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	3554.5	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	580.6	.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	557.0	557.0	2105.3	557.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	644.7	644.7	2384.3	644.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	644.7	644.7	2384.3	644.7	.0	.0	.0	.0

.0	.0	.0	282.0	282.0	1326.8	282.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	335.7	335.7	1509.5	335.7	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	.0	.0	31.2	.0	.0	.0	.0	.0
145.1	44.9	23.2	423.4	423.4	181.8	423.4	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	44.9	44.9	713.1	44.9	.0	.0	.0	.0
280.0	44.5	878.8	549.5	549.5	329.4	549.5	.0	.0	.0	.0
309.4	251.5	941.2	592.1	592.1	358.8	592.1	.0	.0	.0	.0
358.8	309.4	251.5	764.5	764.5	423.0	764.5	.0	.0	.0	.0
390.0	329.4	280.0	820.0	820.0	509.3	820.0	.0	.0	.0	.0
390.0	329.4	280.0	820.0	820.0	509.3	820.0	.0	.0	.0	.0
423.0	358.8	309.4	878.8	878.8	549.5	878.8	.0	.0	.0	.0
423.0	358.8	309.4	878.8	878.8	549.5	878.8	.0	.0	.0	.0
423.0	358.8	309.4	878.8	878.8	549.5	878.8	.0	.0	.0	.0
509.3	390.0	329.4	941.2	941.2	592.1	941.2	.0	.0	.0	.0
549.5	423.0	358.8	1007.3	1007.3	637.3	1007.3	.0	.0	.0	.0
-149.7	-144.5	-170.8	253.1	253.1	-145.1	253.1	.0	.0	.0	.0
-147.5	-151.8	-157.4	279.5	279.5	-21.0	279.5	.0	.0	.0	.0
-145.1	-149.7	-144.5	307.5	307.5	-11.0	307.5	.0	.0	.0	.0
-21.0	-147.5	-151.8	337.1	337.1	-0.5	337.1	.0	.0	.0	.0
-11.0	-145.1	-149.7	368.6	368.6	10.7	368.6	.0	.0	.0	.0
-720.7	-824.3	-754.2	-653.5	.0	.0	-653.5	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-145.1	-145.1	648.3	-145.1	.0	.0	.0	.0
-272.8	-344.8	-327.4	-97.7	-97.7	-283.4	-97.7	.0	.0	.0	.0
-540.3	-715.2	-657.1	-312.0	.0	.0	-312.0	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	334.5	334.5	2288.3	334.5	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	280.8	280.8	1580.1	280.8	.0	.0	.0	.0
57.6	9.0	640.2	277.9	277.9	76.9	277.9	.0	.0	.0	.0
108.4	76.9	57.6	593.9	593.9	252.1	593.9	.0	.0	.0	.0
108.4	76.9	57.6	593.9	593.9	252.1	593.9	.0	.0	.0	.0
76.9	57.6	9.0	509.0	509.0	108.4	509.0	.0	.0	.0	.0
252.1	108.4	76.9	689.3	689.3	305.2	689.3	.0	.0	.0	.0
57.6	9.0	640.2	277.9	277.9	76.9	277.9	.0	.0	.0	.0
.0	.0	.0	-119.0	-119.0	361.8	-119.0	.0	.0	.0	.0
-33.1	-115.5	-122.4	202.5	202.5	-15.1	202.5	.0	.0	.0	.0
-33.1	-115.5	-122.4	202.5	202.5	-15.1	202.5	.0	.0	.0	.0

## ANEXO 6: ARQUIVO RESOLVT1.XLS

Arquivo origem: resolVT1.for

Neste arquivo constam todos os valores obtidos na execução do modelo básico. Aparecem todas as variáveis, desde o grupo 1 até o grupo 8.

O valor da Função Objetivo após 4558 iterações é de: US\$ 49.667.472,20

FOI(4558)= 4,966747220470157E+007

Var. Manejo	INDI	Hectares	Estrato	Regime
1	8	82,70	1	8
1	22	118,00	2	11
1	30	9,00	3	8
1	44	235,40	4	11
1	54	319,80	5	10
1	64	0,00	6	9
1	66	60,70	6	11
1	77	48,20	7	11
1	88	47,00	8	11
1	98	22,80	9	10
1	110	323,20	10	11
1	116	42,80	11	6
1	127	10,20	12	6
1	138	67,00	13	6
1	149	107,70	14	6
1	160	73,80	15	6
1	171	73,80	16	6
1	182	161,00	17	6
1	193	164,70	18	6
1	204	138,50	19	6
1	215	397,70	20	6
1	226	287,00	21	6
1	237	249,00	22	6
1	248	36,50	23	6
1	259	115,40	24	6
1	270	12,60	25	6
1	281	72,10	26	6
1	292	171,30	27	6
1	303	32,60	28	6
1	314	12,50	29	6
1	325	32,90	30	6
1	336	89,60	31	6
1	347	392,20	32	6
1	358	198,90	33	6
1	369	55,10	34	6
1	380	227,80	35	6
1	391	419,60	36	6
1	402	175,30	37	6
1	413	142,60	38	6
1	424	289,40	39	6
1	435	443,60	40	6
1	446	67,10	41	6
1	457	32,10	42	6

1	468	38,90	43	6
1	479	20,70	44	6
1	490	68,10	45	6
1	501	75,60	46	6
1	512	148,50	47	6
1	523	357,70	48	6
1	534	60,80	49	6
1	545	23,60	50	6
1	556	118,40	51	6
1	567	583,20	52	6
1	577	0,03	53	5
1	578	117,67	53	6
1	589	391,00	54	6
1	600	137,20	55	6
1	611	94,80	56	6
1	619	0,02	57	3
1	621	0,03	57	5
1	622	114,55	57	6
1	633	93,70	58	6
1	643	0,01	59	5
1	644	329,39	59	6
1	654	0,02	60	5
1	655	296,88	60	6
1	666	123,10	61	6
1	677	248,90	62	6
1	688	92,60	63	6
1	699	426,80	64	6
1	710	159,40	65	6
1	732	11,00	67	6
1	755	0,01	69	7
1	765	87,50	70	6
1	776	329,20	71	6
1	787	79,40	72	6
1	798	228,90	73	6
1	809	228,90	74	6
1	820	218,80	75	6
1	831	7,50	76	6
1	842	49,60	77	6
1	853	7,90	78	6
1	864	42,60	79	6
1	875	125,30	80	6
Total:		11597,41		

Folga área	Estrato	Hectares	
	2	66	294,20
	2	68	514,10
	2	69	310,69
Total:			1118,99

Compra MP	Periodo	M. Cúbicos	
	3	1	27806,06
	3	2	6499,12
	3	6	2080,89

3	9	31291,39
3	10	38082,22
3	13	59432,57
3	14	36062,68
3	16	5305,14
3	17	50414,37
3	18	18353,49
3	19	14157,70
3	21	5482,00
3	22	28880,54
3	23	72467,20
3	24	43041,09
3	25	45998,36
3	26	54588,10
3	27	33107,93
3	28	6494,74
Total:		579545,59

Folga CMP	Período	M. Cúbicos
4	1	47193,94
4	2	68500,88
4	3	75000,00
4	4	75000,00
4	5	75000,00
4	6	72919,11
4	7	75000,00
4	8	75000,00
4	9	43708,61
4	10	36917,78
4	11	75000,00
4	12	75000,00
4	13	15567,43
4	14	38937,32
4	15	75000,00
4	16	69694,86
4	17	24585,63
4	18	56646,51
4	19	60842,30
4	20	75000,00
4	21	69518,00
4	22	46119,46
4	23	2532,80
4	24	31958,91
4	25	29001,64
4	26	20411,90
4	27	41892,07
4	28	68505,26
4	29	75000,00
4	30	75000,00
Total:		1670454,41

Vendas	INDI	M. Cúbicos	Período	Produto
5	1	2861,42	1	1

5	2	322,53	1	2
5	5	30802,08	1	5
5	6	105917,82	1	6
5	7	120251,72	1	7
5	8	58810,44	1	8
5	15	50252,22	2	5
5	16	164917,89	2	6
5	17	178413,72	2	7
5	18	81585,23	2	8
5	21	1962,06	3	1
5	25	29891,82	3	5
5	26	91961,81	3	6
5	27	98564,45	3	7
5	28	33106,98	3	8
5	29	36486,65	3	9
5	31	6779,91	4	1
5	32	65,29	4	2
5	35	2243,85	4	5
5	36	7129,54	4	6
5	37	8798,86	4	7
5	38	4750,06	4	8
5	39	27844,60	4	9
5	41	13897,63	5	1
5	42	572,55	5	2
5	45	17069,42	5	5
5	46	15312,02	5	6
5	47	18397,83	5	7
5	48	9930,80	5	8
5	49	10614,86	5	9
5	55	45245,90	6	5
5	56	73810,55	6	6
5	57	81339,70	6	7
5	58	32240,84	6	8
5	65	72771,08	7	5
5	66	96120,36	7	6
5	67	112480,10	7	7
5	68	52752,52	7	8
5	69	87840,14	7	9
5	75	55855,86	8	5
5	76	24658,51	8	6
5	77	24680,43	8	7
5	78	8061,64	8	8
5	79	80919,66	8	9
5	85	34831,04	9	5
5	86	68824,76	9	6
5	87	74035,99	9	7
5	88	33874,64	9	8
5	95	5372,03	10	5
5	96	576,60	10	6
5	101	4862,76	11	1
5	102	14323,64	11	2
5	103	16581,35	11	3
5	104	5590,52	11	4

5	105	29711,66	11	5
5	106	2583,26	11	6
5	109	34452,03	11	9
5	111	1625,69	12	1
5	112	2986,90	12	2
5	113	1181,07	12	3
5	115	29385,59	12	5
5	116	5446,39	12	6
5	118	0,17	12	8
5	119	5638,88	12	9
5	121	21075,00	13	1
5	122	56253,28	13	2
5	123	27982,75	13	3
5	124	3166,05	13	4
5	125	385,26	13	5
5	126	0,36	13	6
5	131	481,50	14	1
5	132	1426,50	14	2
5	133	856,80	14	3
5	134	154,80	14	4
5	135	23909,09	14	5
5	136	5511,41	14	6
5	145	32136,92	15	5
5	146	6539,65	15	6
5	149	993,34	15	9
5	155	17615,97	16	5
5	156	1706,41	16	6
5	157	0,23	16	7
5	158	0,08	16	8
5	161	22545,19	17	1
5	162	68375,95	17	2
5	163	47644,75	17	3
5	164	12512,76	17	4
5	165	2031,45	17	5
5	166	531,30	17	6
5	171	21935,24	18	1
5	172	61784,68	18	2
5	173	70087,27	18	3
5	174	22631,01	18	4
5	175	35725,09	18	5
5	176	92528,68	18	6
5	177	92622,32	18	7
5	178	24624,35	18	8
5	181	7139,00	19	1
5	182	25842,00	19	2
5	183	29724,20	19	3
5	184	16307,60	19	4
5	185	70277,68	19	5
5	186	168733,87	19	6
5	187	164869,32	19	7
5	188	43151,73	19	8
5	195	116761,49	20	5
5	196	292103,91	20	6

5	197	302654,81	20	7
5	198	82626,00	20	8
5	199	13100,41	20	9
5	205	107573,96	21	5
5	206	313120,39	21	6
5	207	329471,87	21	7
5	208	89921,53	21	8
5	211	2861,42	22	1
5	212	322,53	22	2
5	215	44454,62	22	5
5	216	96576,66	22	6
5	217	98528,05	22	7
5	218	26840,13	22	8
5	225	4418,55	23	5
5	226	14547,49	23	6
5	227	15683,76	23	7
5	228	7142,22	23	8
5	231	0,01	24	1
5	235	54313,25	24	5
5	236	167799,74	24	6
5	237	178367,92	24	7
5	238	58408,47	24	8
5	241	418,24	25	1
5	245	47405,74	25	5
5	246	154283,44	25	6
5	247	165940,28	25	7
5	248	71854,66	25	8
5	251	9626,02	26	1
5	252	383,75	26	2
5	255	3,62	26	5
5	265	30801,57	27	5
5	266	105919,38	27	6
5	267	120254,05	27	7
5	268	58810,78	27	8
5	275	50254,81	28	5
5	276	164921,93	28	6
5	277	178417,28	28	7
5	278	81586,14	28	8
5	281	1962,05	29	1
5	285	29894,22	29	5
5	286	91964,73	29	6
5	287	98565,85	29	7
5	288	33107,15	29	8
5	289	36485,29	29	9
5	291	6361,67	30	1
5	292	65,29	30	2
5	295	2244,52	30	5
5	296	7130,70	30	6
5	297	8799,54	30	7
5	298	4750,11	30	8
5	299	26129,80	30	9
Total:		7757940,98		



Folga CP	INDI	M. Cúbicos	Período	Producto	
6	9	0,99	1	9	9
6	19	1,00	2	9	9
6	29	1,00	3	9	9
6	39	1,01	4	9	9
6	49	1,00	5	9	9
6	59	1,00	6	9	9
6	69	1,00	7	9	9
6	79	1,00	8	9	9
6	85	1,00	9	5	5
6	95	1,00	10	5	5
6	109	1,00	11	9	9
6	119	1,00	12	9	9
6	125	1,00	13	5	5
6	128	0,08	13	8	8
6	135	1,00	14	5	5
6	138	0,08	14	8	8
6	148	0,12	15	8	8
6	149	1,00	15	9	9
6	155	1,00	16	5	5
6	165	1,00	17	5	5
6	168	0,03	17	8	8
6	175	1,00	18	5	5
6	185	1,00	19	5	5
6	199	1,00	20	9	9
6	205	1,00	21	5	5
6	215	1,00	22	5	5
6	225	1,00	23	5	5
6	235	1,00	24	5	5
6	245	1,00	25	5	5
6	255	1,00	26	5	5
6	265	1,00	27	5	5
6	279	1,00	28	9	9
6	289	1,00	29	9	9
6	299	1,00	30	9	9

VA	INDI	M. Cúbicos	Período	Producto	
7	3	0,00	1	3	3
7	4	0,00	1	4	4
7	11	0,00	2	1	1
7	12	0,00	2	2	2
7	13	0,00	2	3	3
7	14	0,00	2	4	4
7	22	0,00	3	2	2
7	23	0,00	3	3	3
7	24	0,00	3	4	4
7	33	0,00	4	3	3
7	34	0,00	4	4	4
7	43	0,00	5	3	3
7	44	0,00	5	4	4
7	51	0,00	6	1	1
7	52	0,00	6	2	2

7	53	0,00	6	3
7	54	0,00	6	4
7	61	0,00	7	1
7	62	0,00	7	2
7	63	0,00	7	3
7	64	0,00	7	4
7	71	0,00	8	1
7	72	0,00	8	2
7	73	0,00	8	3
7	74	0,00	8	4
7	81	0,00	9	1
7	82	0,00	9	2
7	83	0,00	9	3
7	84	0,00	9	4
7	91	0,00	10	1
7	92	0,00	10	2
7	93	0,00	10	3
7	94	0,00	10	4
7	97	0,00	10	7
7	98	0,00	10	8
7	107	0,00	11	7
7	108	0,00	11	8
7	114	0,00	12	4
7	141	0,00	15	1
7	142	0,00	15	2
7	143	0,00	15	3
7	144	0,00	15	4
7	151	0,00	16	1
7	152	0,00	16	2
7	153	0,00	16	3
7	154	0,00	16	4
7	191	0,00	20	1
7	192	0,00	20	2
7	193	0,00	20	3
7	194	0,00	20	4
7	201	0,00	21	1
7	202	0,00	21	2
7	203	0,00	21	3
7	204	0,00	21	4
7	213	0,00	22	3
7	214	0,00	22	4
7	221	0,00	23	1
7	222	0,00	23	2
7	223	0,00	23	3
7	224	0,00	23	4
7	232	0,00	24	2
7	233	0,00	24	3
7	234	0,00	24	4
7	243	0,00	25	3
7	244	0,00	25	4
7	253	0,00	26	3
7	254	0,00	26	4
7	257	1,00	26	7

7	258	0,00	26	8
7	261	0,00	27	1
7	262	0,00	27	2
7	263	0,00	27	3
7	264	0,00	27	4
7	271	0,00	28	1
7	272	0,00	28	2
7	273	0,00	28	3
7	274	0,00	28	4
7	282	0,00	29	2
7	283	0,00	29	3
7	284	0,00	29	4
7	293	0,00	30	3
7	294	0,00	30	4

FVMAX	Periodo	M. Cúbicos	Prod. Total	CMP	Total
8	1	1133836,06	366163,94	27806,06	393970,00
8	2	956326,03	543673,97	6499,12	550173,08
8	3	1133022,23	366977,77	0	366977,77
8	4	1367383,88	132616,12	0	132616,12
8	5	1339200,88	160799,12	0	160799,12

## ANEXO 7:

Neste arquivo estão representados todos os valores obtidos para a Função Objetivo, após perturbar os coeficientes de produção ou normalmente ou uniformemente.

## ARQUIVO:FOBJ-M.FOR

CV= 1.000000E-01  
4.382819077178904E+007  
3.500179945183344E+007  
4.513823474914259E+007  
CV= 1.000000E-01  
4.561028228539914E+007  
3.873868396870014E+007  
4.013906360315260E+007  
CV= 1.000000E-01  
4.109083901485295E+007  
4.236361606643990E+007  
4.779574067530851E+007  
3.970680503415627E+007  
4.070422272440312E+007  
4.067638690320347E+007  
4.295179397675434E+007  
4.636020362023178E+007  
4.295228655393861E+007  
4.410062419856425E+007  
CV= 1.000000E-01  
4.124739194989068E+007  
4.623179828820933E+007  
4.326043074067221E+007  
3.839939194315109E+007  
3.824430746079312E+007  
4.512595156072190E+007  
4.692130244660853E+007  
4.508890934217983E+007  
4.181377598731942E+007  
3.984026408647633E+007  
4.018484316382229E+007  
4.463649031252797E+007  
4.166114761594492E+007  
4.516525430254158E+007  
CV= 1.000000E-01  
4.138453662750843E+007  
4.510726102774807E+007  
4.587779530751383E+007  
4.794597679035902E+007  
3.906371411103494E+007  
4.361967234146205E+007  
3.784909388222088E+007  
3.554780154005988E+007  
4.376390174761172E+007  
3.831027502835031E+007  
3.929195180871851E+007  
4.400667175294220E+007  
3.909735142941453E+007

4.214878342008780E+007  
4.167732714768714E+007  
4.261090198211658E+007  
CV= 1.000000E-01  
4.382522928410164E+007  
4.296872119131602E+007  
4.437418214808742E+007  
4.328475035648172E+007  
CV= 2.000000E-01  
3.937905380716296E+007  
5.345799926170544E+007  
3.719800379963248E+007  
4.345794278375547E+007  
4.560819881301125E+007  
4.154072276533102E+007  
3.900877195065760E+007  
4.439298287259379E+007  
CV= 2.000000E-01  
4.168850745961744E+007  
4.618102366315716E+007  
4.115165371179618E+007  
3.632144640770878E+007  
4.070056010302815E+007  
CV= 2.000000E-01  
3.410207256255629E+007  
4.212427254435415E+007  
3.601023054705599E+007  
4.485641581029460E+007  
4.021476891085737E+007  
4.633444453715576E+007  
3.384329483674537E+007  
3.928816205378770E+007  
5.173569206575535E+007  
4.459867808832001E+007  
4.660587648260868E+007  
3.268668131039198E+007  
2.828562481661816E+007  
5.409840280491757E+007  
3.534652475324747E+007  
4.457358498543183E+007  
4.589305109640741E+007  
CV= 2.000000E-01  
4.975081417814165E+007  
4.471176641502781E+007  
4.131275313826810E+007  
4.496948631424534E+007  
5.034472546143252E+007  
5.149265564774030E+007  
4.276158172090700E+007  
4.140736929577518E+007  
3.944764385909220E+007  
CV= 2.000000E-01  
4.849733735045905E+007  
4.520642864810601E+007  
4.797022954081079E+007  
4.047985017583799E+007

5.193097233747680E+007  
4.785786878391761E+007  
4.384618736075949E+007  
5.177729725290227E+007  
4.228521200371508E+007  
3.660359982676891E+007  
4.509527931879646E+007

CV= 3.000000E-01

3.659931695236363E+007  
4.334143169323825E+007  
3.596512488150653E+007  
4.471423789904783E+007  
5.058649378967603E+007  
4.799725320206293E+007  
5.252453629877921E+007  
5.023146794776895E+007  
2.529298267334268E+007

CV= 3.000000E-01

3.523772274989060E+007  
4.941567179049553E+007  
2.926644324916781E+007  
3.219319676203459E+007  
3.901408068314536E+007  
4.132339653288999E+007

CV= 3.000000E-01

3.790825020007370E+007  
4.114876763356617E+007  
3.609876647346763E+007  
2.422989829703617E+007  
3.778240324068496E+007  
5.256423067796119E+007  
3.382143079642564E+007  
4.412097933446480E+007  
4.666215951114589E+007  
5.646310307489156E+007  
3.985234483280665E+007  
3.946286396908112E+007  
5.814378600307987E+007  
2.896105306060832E+007

CV= 3.000000E-01

4.379571906631638E+007  
4.393696557991506E+007  
4.112341368348178E+007  
5.406816817943580E+007  
4.808115772597311E+007  
5.520452542040000E+007  
4.903236842729994E+007  
3.089400643349578E+007  
5.519192761665674E+007

CV= 3.000000E-01

4.547075610005078E+007  
3.651851737613590E+007  
4.123540303564339E+007  
4.839175114621975E+007  
4.662926796236985E+007  
4.311142356272293E+007

3.887930177878951E+007  
 4.379040426946338E+007  
 3.171013576705458E+007  
 5.449675093913737E+007  
 4.718214892692390E+007  
 3.800549591747464E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 6.660000000000000E-001 LIMsup= 1.333000000000000  
 4.145199452739648E+007  
 4.328900895834592E+007  
 4.191728756278998E+007  
 4.699424234865198E+007  
 3.428353631563602E+007  
 3.898962368433668E+007  
 4.100298089486837E+007  
 4.785300726649558E+007  
 4.368852945902064E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 6.660000000000000E-001 LIMsup= 1.333000000000000  
 4.668806137780907E+007  
 3.532468619456918E+007  
 4.072639498481294E+007  
 3.685775120655415E+007  
 4.060147665747502E+007  
 3.783493749996889E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 6.660000000000000E-001 LIMsup= 1.333000000000000  
 3.654809577124232E+007  
 4.498564011003080E+007  
 3.992481261063611E+007  
 4.458891729462630E+007  
 4.263828464575496E+007  
 4.650062401702652E+007  
 4.013129795159324E+007  
 4.598704978922863E+007  
 4.273263686550673E+007  
 4.318844680287942E+007  
 4.230489542748304E+007  
 3.900438755393711E+007  
 4.179314946188436E+007  
 4.303447415933480E+007  
 3.640849715677308E+007  
 4.51855258293165E+007  
 4.905661172620606E+007  
 4.002667455979972E+007  
 4.346058974490999E+007  
 3.681818465054373E+007  
 3.381809768726086E+007(saiu por número de iterações)  
 4.400684709462559E+007  
 4.267891850019477E+007  
 3.898601050783540E+007  
 3.848327877184503E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 6.660000000000000E-001 LIMsup= 1.333000000000000  
 4.315692520546755E+007  
 4.041698661713906E+007

4.225272103383665E+007  
 4.354675600101243E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 6.660000000000000E-001 LIMsup= 1.333000000000000  
 4.503799453953173E+007  
 4.884763085120355E+007  
 3.862585245825347E+007  
 3.630114091010023E+007  
 3.440125134832990E+007  
 4.543609900603518E+007  
 4.866314444037459E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 5.000000000000000E-001 LIMsup= 1.500000000000000  
 4.634239616228166E+007  
 3.070848155548849E+007  
 4.177751708731353E+007  
 4.471452339189945E+007  
 3.352524562924770E+007  
 5.300391834383825E+007  
 3.649290414181935E+007  
 4.740212772261721E+007  
 4.214234057814426E+007  
 4.896523032484972E+007  
 4.223983006910279E+007  
 5.183264395057428E+007  
 3.094323412622027E+007  
 5.007365462427042E+007  
 4.056998821368385E+007  
 4.309519990871808E+007  
 5.300949903804814E+007  
 4.447098305990983E+007  
 4.783806044322195E+007  
 3.254790332751297E+007  
 simulacao uniforme  
 LIMinf= 5.000000000000000E-001 LIMsup= 1.500000000000000  
 4.418526611666594E+007  
 3.620976662932064E+007  
 5.208653078551442E+007  
 3.933915391698439E+007  
 6.851710481777313E+007  
 3.534904598917940E+007  
 3.335283126074088E+007  
 4.883923254435191E+007  
 4.875730165554655E+007  
 5.101147349490458E+007  
 3.895204198687956E+007  
 4.911963180651091E+007  
 4.352724769375390E+007  
 4.604253127012187E+007  
 4.392063440065526E+007  
 5.097524715288469E+007  
 3.573151008519278E+007  
 4.235656384871045E+007  
 3.189509827906175E+007  
 4.161853686018284E+007  
 3.759421804882313E+007



5.236255577418885E+007  
 5.080449861446155E+007  
 5.305109951442464E+007  
 3.517457463381467E+007  
 3.984658794119132E+007  
 4.818164767598967E+007  
 4.709143754758697E+007

simulacao uniforme

LIMinf= 5.000000000000000E-001 LIMsup= 1.500000000000000

3.611029779471589E+007  
 4.179062368749431E+007

simulacao uniforme

LIMinf= 3.330000000000000E-001 LIMsup= 1.666000000000000

3.569030954481220E+007  
 6.079684917378479E+007  
 5.230563517841662E+007  
 3.229923390327473E+007  
 5.217891504125939E+007  
 3.517391289522828E+007  
 4.283516953906600E+007  
 4.068223338563202E+007  
 3.420845373874737E+007  
 4.821171435780857E+007  
 5.776240130471888E+007  
 4.087091422038928E+007  
 4.219022408441447E+007  
 3.734993491877165E+007  
 4.793044677516884E+007  
 3.445567573735879E+007  
 3.952742487128276E+007  
 2.814793011302892E+007  
 3.245492937485997E+007  
 4.348950993476794E+007  
 2.889240747468888E+007  
 2.644988693595463E+007  
 5.574915623566152E+007  
 3.936126223658186E+007  
 3.606540944971161E+007  
 3.671700872369770E+007  
 3.344765313976340E+007  
 3.472873117809635E+007

simulacao uniforme

LIMinf= 3.330000000000000E-001 LIMsup= 1.666000000000000

2.689518159537492E+007  
 4.740326109256541E+007  
 5.480190987210508E+007  
 4.400844205387127E+007  
 3.961236082969806E+007  
 5.012080385488273E+007  
 4.470158754503827E+007  
 4.218656351533214E+007  
 3.873224844619443E+007  
 5.349845760204587E+007  
 5.221395589849013E+007  
 3.101745198845515E+007  
 4.314970433419655E+007

3.271509339814478E+007  
3.297472466846653E+007  
4.898018308025499E+007  
4.011991632985637E+007  
4.874202299970167E+007  
5.780101319720619E+007  
3.926893561693540E+007  
5.435537993858458E+007  
simulacao uniforme  
LIMinf= 3.330000000000000E-001 LIMsup= 1.666000000000000  
4.086381675458427E+007

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHRENS, S. 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. Curitiba, 1992. Tese de doutorado. Setor de Ciências Agrárias, UFPR.
2. BARE, B. B. & FIELD, R. C. An evaluation of FORPLAN from an Operations Research perspective. In: FORPLAN: An evaluation of a Forest Planning Tool. Denver, Colorado. November 4-6, 1986, p 133-144.
3. BARROS, O. & WEINTRAUB, A. Planning for a vertically integrated forest industry. Operations Research, V.30, n. 6, 1982, p 1168-1182.
4. BERGER, R. Análise benefício-custo: instrumento de auxílio para tomada de decisões na empresa florestal. Piracicaba, 1980. Circular Técnica n. 97. IPEF, ESALQ, USP.
5. \_\_\_\_\_. Aplicações de critérios econômicos para determinação da maturidade financeira de povoamentos de *eucalyptos*. Curitiba, 1985. Tese de Professor Titular. Setor Ciências Agrárias, UFPR.
6. CARNIERI, C. Planejamento florestal otimizado via redes de manejo. Campinas, 1989. Tese de doutorado. UNICAMP.
7. \_\_\_\_\_, GAVINHO, L. & MAESTRI, R. Um sistema de planejamento florestal. In: II Encontro de Planejamento Florestal. Anais. Curitiba, 1991.
8. CHAVES NETO, A. Controle estatístico de qualidade. Notas de aula. Curitiba, 1996. p 36.
9. CLUTTER, J. & FORTSON, J. & PIENAAR, L. & BRISTER, G. & BAILEY, R. Timber management: A quantitative approach. Ed. John Wiley & Sons, 1983, 351p.
10. DACHS, J. N. Estatística computacional. Ed. Livros técnicos e científicos Editora Ltda., 1988, p 24-28.

11. DANTZIG, G. B. & VAN SLYKE R.M., Generalized Upper Bounding Techniques, Journal of Computer and System Sciences . V.1, 1967, p 213-226.
12. DE ANGELIS, D. L. Panelist Discussion of FORPLAN Evaluation Papers. In: FORPLAN: An evaluation of a Forest Planning Tool. Denver, Colorado. November 4-6, 1986, p 41-44.
13. DYKSTRA, D. P. Evaluation of FORPLAN from an Operations Research perspective: Discussant's Comments. In: FORPLAN: An evaluation of a Forest Planning Tool. Denver, Colorado. November 4-6, 1986, p 145-146.
14. EID, T. Random errors and strategic planning in forestry. Medd. Skogforsk. V.46, n.7, 1993, p 1-24.
15. FILLIBEN, J. The probability plot correlation coefficient test for normality . Technometrics V.17, n. 1, 1975, p 111-117.
16. GASS, S. Linear programming : Methods an applications . 4. ed., Ed. Mc. Graw-Hill, 1975, p 221-235.
17. GITMAN, L. J. Princípios de Administração Financeira, 3. ed., Ed. Harbra, 1987.
18. HOF, J. & BEVERS, M. & PICKENS, J. Pragmatic approaches to optimization with random yield coefficients . Forest Science. V.41, n.3, 1995, p 501-512 .
19. \_\_\_\_\_ & KENT, B.M. & PICKENS, J. B. Chance constraints and chance maximization with random yield coefficients in renewable resource optimization. Forest Science. V.38, n.1, 1992, p 305-323.
20. \_\_\_\_\_ & PICKENS, J.B. Chance-constrained and chance-maximizing mathematical programs in renewable resource management . Forest Science. V.37, n.1, 1991, p 308-325.
21. \_\_\_\_\_ & ROBINSON, K. & BETTERS, D. Optimization with expected values of random yield coefficients in renewable resource linear programs. Forest Science, V.34, n.3, 1988, p 634-646.

22. JOHNSON, K.N. & SCHEURMAN, L. Techniques for Prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - Discussion and synthesis, Supplement to Forest Science, V.23, n. 1, 1977.
23. \_\_\_\_\_ & STUART, T. & CRIMM, S.A. FORPLAN, Version 2: An overview. USDA Forest Service. Land Management Planning. System Section, Washington, 1986.
24. JOHNSON, R. & WICHERN, D. Applied multivariate statistical analysis. 2. ed., Ed. Prentice Hall, 1988.
25. LEUSCHNER, W. A. Introduction to forest resource management. Ed. John Wiley & Sons, 1984, p 201-207.
26. MURTY, K. G. Linear and combinatorial programming. 2. Ed., Ed. Robert Krieger Pu., 1985.
27. NEWNHAM, R. M. LOGPLAN: A model for planning logging operations. Ottawa, 1975. Information Report FMR-X, 77, 59 p.
28. OLIVEIRA, Y. M. M. & OLIVEIRA, E. B. & HAFLEY, W. L. SisPinus - simulador de crescimento e de produção para plantios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* no sul do Brasil. In: II Encontro Nacional sobre Planejamento Florestal, Anais, Curitiba, 1989, EMBRAPA.
29. PICKENS, J. & DRESS, P. Use of stochastic production coefficients in linear programming models: objective function distribution, feasibility and dual activities, Forest Science, V. 34, n.3, 1988, p 574-591.
30. \_\_\_\_\_ & HOF, J. G. Accounting for stochastic variation in Linear Programming Technical Coefficients. In: System Analysis in Forest Resources. Asilomar, California, March 29 to April 1, 1988, p 54-58.
31. PUCCINI, A L. & PIZZOLATO, N. Programação Linear. 2. Ed., Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1990.

32. PUKKALA, T. & KANGAS, J. A method for integrating risk and attitude toward risk into forest planning. Forest Science. V.42, n.2, 1996, p 198-205.
33. RIBEIRO, C. A. A. S. & GRAÇA, L.R. Manejo por talhadia: estabelecimento das idades ótimas de corte. Revista Árvore, Viçosa, MG, V.20, n.1, 1996, p 29-36.
34. RODRIGUEZ, L. C. E. & MOREIRA, R. M. Gerenciamento de florestas de *Eucalyptus* com modelo de programação linear. Piracicaba, 1989, IPEF, ESALQ, USP.
35. SANQUETTA, C. R. Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal. FUPEF Série didática Nº 8, setembro 1996.
36. \_\_\_\_\_. A model of natural regeneration process of a fir-hemlock forest, southwestern Japan. Japan, 1994. Doctoral dissertation, Ehime University.
37. SANVICENTE, A Z. Administração Financeira, 3. ed., Ed. Atlas, 1991.
38. SCOLFORO, J. R. S. Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribea* var. *hondurensis*. Curitiba, 1990. Tese de doutorado . Setor de Ciências Agrárias, UFPR.
39. SHIMIZU, T. Simulação em computador digital. Publicação da USP, p 3-6, 1973.
40. SMITH, E.L. Consideration of risk in forest project analysis. In: System Analysis in Forest Resources. Asilomar, California, March 29 to April 1, 1988, p 241-244.
41. SPAIN, J. D. BASIC Microcomputer models in biology. Ed. Addison-Wesley Publ. Comp. 1982, p 347.
42. TAUBE NETTO, M. Um modelo de Programação Linear para planejamento de floresta de *Eucalyptus*. Pesquisa Operacional, V.4, n.1, 1984.
43. THOMPSON, E. F. & HAYNES, R. A linear programming probabilistic approach to decision making under uncertainty . Forest Science. V.17, 1970, p 224-229.

44. WAGNER, H. Pesquisa Operacional. 2. ed., Ed. Prentice Hall do Brasil, 1986.
45. WARE, G. O & CLUTTER, J. L. A mathematical programming system for the management of industrial forest. Forest Science, V.17, n.4, 1971, p 428-445.
46. WEINTRAUB, A. & ABRAMOVICH . Analysis of uncertainty of future timber yields in forest management. Forest Science. V. 41, n.2, 1995, p 217-234.