

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO

SÉRGIO LUIZ DE MEDEIROS RIVERO

**O Nó da Madeira: Modelagem e
Simulação Multiagentes da Exploração
Madeireira em Rondônia**

Belém

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO

SÉRGIO LUIZ DE MEDEIROS RIVERO

**O Nó da Madeira: Modelagem e
Simulação Multiagentes da Exploração
Madeireira em Rondônia**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências: Desenvolvimento Socioambiental.

Orientador: PROF. DR. MARCOS XIMENES PONTE

**Belém
2004**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO

SÉRGIO LUIZ DE MEDEIROS RIVERO

O Nó da Madeira: Modelagem e Simulação Multiagentes da Exploração Madeireira em Rondônia

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Ximenes Ponte
NAEA/UFPA - Orientador

Dr. Alfredo Kingo Oyama Homma
EMBRAPA - Examinador

Prof Dr. Gilson Medeiros e Silva
UNIR - Examinador

Prof. Dr. David Gibbs McGrath
NAEA/UFPA - Examinador

Prof. Dr. Francisco de Assis Costa
NAEA/UFPA - Examinador

Belém
2004

Aos meus filhos

Antônio e Clara

que me ajudam a encontrar

o rumo e o centro

Agradecimentos

Ao meu orientador Marcos Ximenes, pelo apoio e confiança irrestritos.

Aos meus grandes amigos Toby McGrath e Dan Nepstad, por toda ajuda e colaboração que me deram. E pelas ótimas conversas pelo mundo afora.

À Professora Tereza Ximenes, por sua compreensão e tolerância.

A Frank Merry do WHRC, por seu apoio e desprendimento me cedendo dados de sua pesquisa.

Aos meus amigos no LABOGEOHPA, IPAM e WHRC que me receberam tão bem.

Aos amigos Tuninho e Dorisvalder, que apoiaram irestritamente a simulação do modelo, fornecendo preciosas horas de seus equipamentos, bem como pelo apoio crítico na elaboração do texto da tese. E também aos meus queridos amigos Dante e Maciel, pelos saudáveis debates.

A Fabíola e Marco Antonio, por sua hospitalidade nos dois meses em Belém.

A Betinha e Ana, por sua ajuda na coleta dos dados.

Ao Albano, do NAEA por seu inestimável apoio.

À UNIR e RIOMAR que financiaram e apoiaram meu curso de Doutorado.

Ao IPAM que me apoiou no trabalho de pesquisa.

À SUNY/USAID que financiou o meu estágio sanduíche em Woods Hole.

Mudam-se os tempos, mudam-se as vontades,
muda-se o ser, muda-se a confiança;
todo mundo é composto de mudança,
tomando sempre novas qualidades.

Continuamente vemos novidades,
diferentes em tudo da esperança;
do mal ficam as mágoas na lembrança,
e do bem (se algum houve), as saudades.

O tempo cobre o chão de verde manto,
que já coberto foi de neve fria,
e, enfim, converte em choro o doce canto.

E, afora este mudar-se cada dia,
outra mudança faz de mor espanto,
que não se muda já como soía.

Luís de Camões
Soneto 92

Resumo

Nesta tese se implementa um modelo de simulação multiagentes para avaliar como a capacidade de fiscalização do Estado, políticas alternativas de tributação e preços de mercado podem influenciar as estratégias de exploração e manejo de madeira da indústria de madeira em Rondônia. Este modelo incorpora a noção de estratégia e permite estabelecer a relação entre estratégia e dinâmica agregada da exploração madeireira. Este modelo embute custos operacionais, custos tributários e preços diferenciados por tipo de estratégia de exploração (s_1 e s_2) e incorpora a capacidade do Estado de punir a exploração ilegal de madeira. O modelo demonstrou ser apropriado para avaliar os impactos de políticas de fiscalização e tributação bem como de diferentes condições de mercado sobre as estratégias de exploração das madeiras. Este modelo pode ser usado como uma ferramenta para subsidiar a análise de políticas públicas que promovam estratégias de exploração sustentáveis. Para a implementação do modelo de simulação elaborado para a tese foi construído, em *Squeak Smalltalk*, um *arcabouço* de simulação, chamado de *Sim2(ECO)* que permite a geração de cenários para a indústria madeireira. Este *software* é aberto e adaptável para outros problemas de simulação de dinâmica do uso do solo na Amazônia.

As seguintes hipóteses foram testadas neste trabalho: 1) As condições de exploração (majoritariamente predatória e ilegal), a demanda do mercado (essencialmente interna indiferente às estratégias de exploração da madeira) implicam em ganhos maiores quando os agentes escolhem uma estratégia *predatórias* do que quando mantêm uma estratégia *sustentável* (exploração de baixo impacto com manejo florestal sustentável); 2) Políticas consistentes para a promoção da exploração sustentável

de madeira passam pelo aumento de restrições e fiscalização (diminuindo o *payoff* de uma estratégia predatória) bem como por incentivos à escolha de estratégias de exploração sustentáveis tanto para as pequenas quanto para as médias madeireiras; 3) Preços de mercado diferenciados influenciam as escolhas dos madeireiros por práticas de exploração;

Em relação à primeira hipótese levantada neste trabalho, se pôde constatar que as atuais condições de exploração de madeira ainda são, em sua maioria, favoráveis ao uso pelos agentes de estratégias predatórias. Quando à segunda hipótese, os ganhos das estratégias predatórias diminuem significativamente em relação aos ganhos das estratégias sustentáveis com um pequeno aumento na probabilidade de apreensão da madeira extraída ilegalmente. O tamanho das madeireiras é significativo em relação a como elas são afetadas por diversas alternativas de política pública. Pequenas madeireiras são menos sensíveis a políticas de tributação diferenciada que grandes madeireiras. Em relação à terceira hipótese, pode-se afirmar que preços de mercado diferenciados são significativos, mas não suficientes, para tornar estratégias sustentáveis dominantes.

Abstract

In this thesis it was implemented a multi-agent simulation model to evaluate how government enforcement capacity, alternative taxation policies and market prices can influence the wooden exploitation strategies of Rondônia timber industry. This model incorporates the notion of *strategy* and allows to establish the relation between exploitation strategy for each agent and the aggregate dynamics of timber exploitation. The model inlays industry operational and taxation costs and prices, differentiated for type of exploration strategy (s_1 e s_2). The model also incorporates the State enforcement capacity (i.e, the capacity to punish wooden illegal exploitation). The model implemented here demonstrated to be an usefull toll to evaluate the impacts of different fiscalization and taxation policies as well different price conditions over the agents exploitation strategies. This model can be used as a tool to subsidize the analysis of alternative public policies for the promotion of timber exploitation sustainable strategies. The simulation model was implemented in *Squeak Smalltalk* . This simulation framework (*Sim2(ECO)*) allows the generation of alternative scenarios lumber industry. This software is opened and adaptable for other land use change problems in Amazônia.

The following hypotheses had been tested in this work: 1) the exploitation conditions (mainly predatory and illegal), market demmand (essentially internal and indifferent to the exploitation strategies) imply in bigger profits for *predatory strategies* than *sustainable strategies* (reduced impact logging, sustainable forest management); 2) the promotion of sustainable exploitation strategies depends on better enforcement conditions (diminishing predatory strategies payoffs) as well as public

incentives for the agents to choose sustainable exploitation strategies. These policies must be used either for Large and Small mills; 3) bigger market prices for sustainable exploited timber can influence the mills exploitation strategies.

In relation to the first hypothesis, the evidence raised here demonstrated that, at the current exploitation conditions, the use of predatory strategies by the agents still are, in its majority, the best economically rational choice. For second hypothesis, the profits of the predatory strategies diminish significantly with a small increase in the government enforcement conditions. Mill size is significant in relation as they are affected by diverse alternatives of public policies. Small mills are less sensible the policies of differentiated taxation than great mills. In relation to the third hypothesis, it can be affirmed that differentiated market prices for type of strategy are significant, but not enough, to make sustainable strategies the dominant strategies in the model.

Sumário

Lista de Tabelas	p. vi
Lista de Figuras	p. viii
Introdução	p. 2
Árvores, Madeira e Governança: um Problema Sócio-Econômico-Ecológico	p. 4
Objetivo do Trabalho	p. 8
Hipóteses	p. 8
O Modelo Implementado	p. 9
O Ambiente de Simulação Multiagentes	p. 10
A estrutura do trabalho	p. 10
1 Complexidade, Racionalidade, Estratégias e Agentes	p. 13
1.1 A Complexidade dos Sistemas Sócio-econômicos e a Complexidade da Modelagem	p. 14
1.2 Racionalidade, Utilidade e Estratégias	p. 17
1.2.1 Racionalidade Forte e Racionalidade Fraca	p. 18
1.2.2 Utilidade e Funções Utilidade	p. 21
1.2.3 A Noção de Estratégia	p. 25
1.2.4 Interação, Complexidade e Jogos	p. 28
1.3 Teoria dos Jogos, Agentes e Sistemas Multiagentes	p. 30

1.3.1	Estratégias, Aprendizado e Evolução	p. 30
1.3.2	Complexidade e Simulação Multiagentes	p. 34
1.3.3	O Agente Adaptativo Artificial para Simulação Econômica	p. 37
1.4	Recursos Comuns, Ação Coletiva e Sistemas Multiagentes	p. 40
1.4.1	Recursos Comuns e a Tragédia dos Comuns	p. 40
1.4.2	Racionalidade e Ação Coletiva	p. 44
1.4.3	Ambiente e Racionalidade dos Agentes	p. 47
1.4.4	Arcabouço Institucional e Comportamento Estratégico	p. 48
1.4.5	Transformação do Ambiente, Complexidade e Comportamento Estratégico	p. 51
2	Modelagem e Simulação Multiagentes	p. 54
2.1	Simulação Computacional de Processos Econômicos	p. 55
2.1.1	Economia Computacional e Simulação Baseada em Agentes	p. 58
2.1.2	Simulação Computacional Multiagentes	p. 60
2.2	Modelos Baseados em Agentes	p. 63
2.2.1	Arcabouços de Simulação Multiagentes	p. 67
2.2.1.1	Swarm	p. 69
2.2.1.2	RePast	p. 71
2.2.1.3	Cormas	p. 73
2.2.1.4	Características de Arcabouços de Simulação Multiagentes	p. 74
2.3	Sim(2ECO) - O Arcabouço de Simulação	p. 76
2.3.1	As Classes do Sim(2ECO)	p. 76
2.3.2	Implementação do Agente Adaptativo Artificial	p. 83

2.3.3	O Uso de Algoritmos Adaptativos no Modelo	p. 85
2.3.4	Problemas em aberto, armadilhas, dificuldades, críticas	p. 88
3	Modelos para a Exploração Madeireira na Amazônia	p. 90
3.1	A Atividade Madeireira e a Floresta como um Problema Ecológico e Econômico	p. 90
3.2	Modelos Econômicos de Desmatamento: o Papel da Atividade Madeireira)	p. 93
3.3	Modelos Baseados em Agentes para Mudança do Uso do Solo na Amazônia	p. 105
3.4	Modelos Econômicos e de Simulação para a Atividade Madeireira	p. 112
3.5	O Modelo de Steve Stone	p. 121
3.6	Políticas Públicas e a Mudança do Uso do Solo na Amazônia: O Papel da Modelagem e Simulação	p. 127
4	O Modelo Baseado em Agentes Adaptativos Artificiais: Formulação e Implementação para o Problema da Exploração Madeireira	p. 133
4.1	Estratégias e Aprendizado	p. 133
4.2	O Modelo Baseado em Agentes	p. 136
4.2.1	O Problema de Decisão dos Agentes	p. 137
4.2.1.1	Rentabilidade Esperada e Lucro Esperado	p. 137
4.2.1.2	Estratégias, Riscos da Ilegalidade e Governança	p. 139
4.2.1.3	O Problema de Decisão do Agente ($\max u_j^e$).	p. 141
4.2.1.4	Condições de Entrada e Saída	p. 142
4.2.1.5	A decisão de Mudar ou Sair do Negócio	p. 144
4.2.2	A Escolha das Estratégias	p. 145

4.3	Implementação do Modelo	p. 146
4.4	Estratégias: Implementação, Evolução e Equilíbrio	p. 150
4.4.1	O Algoritmo Genético	p. 150
4.4.2	Implementação das Estratégias no AG	p. 152
4.4.3	Implementação das Funções Objetivo	p. 153
4.4.4	Implementações e Restrições do Algoritmo Genético e do Modelo	p. 154
5	As Madeiras de Rondônia	p. 157
5.1	Metodologia de Coleta dos Dados	p. 157
5.2	Os Agentes: A indústria Madeireira	p. 157
5.3	A Atividade Madeireira em Rondônia	p. 161
5.3.1	As Divergências nas Estimativas	p. 163
5.3.2	Uso do Solo	p. 164
5.3.3	Características das Madeiras em Rondônia	p. 165
5.3.4	Quantidade e Localização das Serrarias	p. 167
5.4	Os Custos, Rentabilidade e Estratégias	p. 175
5.5	Os Resultados da Pesquisa de Campo	p. 180
6	Simulações e Cenários	p. 203
6.1	Calibração do Modelo e Planejamento dos Cenários	p. 203
6.2	Cenários	p. 206
6.2.1	Caso Base	p. 206
6.2.2	Influência da Governança (Cenário I)	p. 213
6.2.3	Tarifação Reduzida para Manejo (Cenário II)	p. 218

6.2.4	Preços Diferenciados por tipo de Estratégia (Cenário III) .	p. 229
6.3	Discussão dos Resultados das Simulações	p. 245
6.4	Problemas em Aberto	p. 247
Conclusões e Recomendações		p. 249
	Conclusões	p. 249
	Recomendações	p. 252
Referências Bibliográficas		p. 255
ANEXO I - Questionário Aplicado na Amostra		p. 266

Lista de Tabelas

1	Protocolos - Schedule	p. 86
2	Pecuária - Receita Líquida por R\$ $ha^{-1}ano^{-1}$	p. 101
3	Destino das madeiras amazônicas, 1997	p. 114
4	Produção Estimada de Madeira - Paragominas (1992).	p. 158
5	Estatísticas de Produção por Tipo de Madeireira (m^3ano^{-1}) - Pará (Breves, Tailândia e Paragominas)	p. 159
6	População Urbana e Rural de Rondônia (1970-2000)	p. 161
7	Número de Planos de Manejo Protocolados em Rondônia (1986-1998)p.	162
8	Zonas Propostas no Planafloro	p. 164
9	Rondônia - Composição do Segmento Madeireiro/Moveleiro: Prin- cipais Atividades (1989-1997)	p. 166
10	Porte das Indústrias (%) e Intensidade da Exploração nos Pólos Madeireiros - RO	p. 169
11	Produção de Madeira Processada da Amazônia (%)	p. 172
12	Madeira Vendida dos Estados da Amazônia Legal para Regiões do Brasil, São Paulo e Exterior (Milhares de m^3 processados)	p. 173
13	Preços da Madeira em Pé em áreas próximas a FLONAS (R\$/ m^3_{tora})p.	177
14	Custos do Manejo Convencional versus Manejo SUs tentável (US\$/ m^3)p.	178
15	Tempo de Operação das Madeireiras(anos)	p. 182
16	Volume de Toras Utilizado em 2002 (m^3)	p. 186

17	Produção das Madeireiras Amostradas em m^3 por Classe e Produto (2002)	p. 191
18	Custos das Madeireiras - Total da Amostra (R\$)	p. 193
19	Custos das Madeireiras - Sem Extração (R\$)	p. 194
20	Custos das Madeireiras - Com Extração (R\$)	p. 194
21	Volumes Explorados por Area - Com Extração (R\$)	p. 196
22	Preços Médios de Venda da Madeira - Total da Amostra (R\$/ m^3)	p. 197
23	Custos e Preços das Madeireiras Pesquisa de Campo vs Literatura (US\$)	p. 200
24	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário I - Caso Base ($g = 0$)	p. 210
25	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário I - Caso Base ($g = 0$)	p. 213
26	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 1	p. 219
27	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 2	p. 224
28	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 3	p. 229
29	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário III - Caso 1	p. 235
30	Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário III - Caso 5	p. 245

Lista de Figuras

1	Classes Básicas do Arcabouço de Simulação	p. 77
2	Visão típica da execução de uma simulação	p. 81
3	Visão simplificada do Agente	p. 84
4	Causas Subjacentes, Imediatas e Fontes do Desflorestamento	p. 96
5	Madeireiras por Setor de Atividade	p. 168
6	Número de Planos de Manejo Protocolados pelo IBAMA (1986-1996)p.	171
7	Produção vs Exportação de não coníferas - Brasil (1980-2002)	p. 174
8	Anos Operação das Madeireiras Amostradas (Total da Amostra)	p. 183
9	Anos Operação das Madeireiras Amostradas (Sem Extração)	p. 184
10	Anos Operação das Madeireiras Amostradas(Com Extração)	p. 185
11	Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Total da Amostra)	p. 187
12	Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Sem Extração)p.	188
13	Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Com Extração)	p. 189
14	Produção das madeireiras por tipo de produto (Total da Amostra)	p. 192
15	Variação dos Preços da Madeira por tipo e Mercado(Total)	p. 198
16	Cenário I - Caso Base: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 208
17	Cenário I - Caso Base: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 209

18	Cenário I - Caso Base: Lucros para a Pequena Madeireira	p. 211
19	Cenário I - Caso Base: Lucros para a Grande Madeireira	p. 212
20	Cenário I - ($g = 0,1$): Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 214
21	Cenário I - ($g = 0,1$): Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grande Madeireiras)	p. 215
22	Cenário I - ($g = 0.1$): Lucros para Pequena Madeireira	p. 216
23	Cenário I - ($g = 0.1$): Lucros para Grande Madeireira	p. 217
24	Cenário II - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 220
25	Cenário II - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 221
26	Cenário II - Caso 1: Lucros para Pequena Madeireira	p. 222
27	Cenário II - Caso 1: Lucros para Grande Madeireira	p. 223
28	Cenário II - Caso 2: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 225
29	Cenário II - Caso 2: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 226
30	Cenário II - Caso 2: Lucros para Pequena Madeireira	p. 227
31	Cenário II - Caso 2: Lucros para Grande Madeireira	p. 228
32	Cenário II - Caso 3: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 230
33	Cenário II - Caso 3: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 231
34	Cenário II - Caso 3: Lucros para Pequena Madeireira	p. 232
35	Cenário II - Caso 3: Lucros para Grande Madeireira	p. 233

36	Cenário III - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 236
37	Cenário III - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 237
38	Cenário III - Caso 1: Lucros para Pequena Madeireira	p. 238
39	Cenário III - Caso 1: Lucros para Grande Madeireira	p. 239
40	Cenário III - Caso 5: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)	p. 241
41	Cenário III - Caso 5: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)	p. 242
42	Cenário III - Caso 5: Lucros para Pequena Madeireira	p. 243
43	Cenário III - Caso 5: Lucros para Grande Madeireira	p. 244

Introdução

O Brasil tem 5.5 milhões de km² de florestas nativas(MMA, 2000), 2/3 destas florestas estão na Amazônia. Todo ano entre 10.000 e 15.000 km² são afetados por atividades madeireiras na Amazônia. Estes danos empobrecem a floresta e aumentam a probabilidade de ocorrência de fogo (NEPSTAD, 1999). A atividade florestal, porém, contribui no Brasil, segundo dados do MMA (Ministério do Meio Ambiente e Recursos Naturais) com aproximadamente 4% do PIB (Produto Interno Bruto) e em torno de 15% do PIB da Região Norte. O setor florestal também é responsável por em torno de 2 milhões de empregos diretos (a maioria deles relacionada com a extração de madeira de florestas nativas) e gera US\$ 1,3 milhão.ano⁻¹ em impostos (MMA, 2000). Segundo dados do Censo Agropecuário de 1996, a produção de madeira em tora dos estados da Amazônia Legal¹ foi de 9,2 milhões de m³, o que corresponde a 78% da produção total de madeira contada pelo censo(IBGE, 1996). Dados do MMA mostram que a produção de madeira em tora do Brasil é atualmente de 30 milhões m³ ano⁻¹, o que corresponde a quase 85% de toda a madeira em tora extraída de florestas nativas no Brasil. A maior parte desta madeira é processada de maneira ineficiente com um índice de aproveitamento de apenas 33%(MMA, 2000). A atividade madeireira tem então, um papel ambíguo; por um lado é uma ativi-

¹Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima.

dade que empobrece a floresta, tornando-a mais suscetível a fogo; por outro lado ela tem um importante papel na vida econômica regional e algum poder político, o que sustenta a sua capacidade de influenciar decisões de governos locais e agências governamentais nacionais.

A atividade madeireira não vai desaparecer da Amazônia, as dinâmicas sociais e econômicas que a produzem (assim como a existência de estoques de madeira na floresta) permitem inferir que ainda há um enorme espaço para a manutenção de uma indústria madeireira rentável na região. O papel desta indústria na economia regional motiva os governos locais (de municípios e estados) a favorecerem a atividade de extração de madeira de florestas nativas. Diante disto, o problema sobre a extração madeireira na Amazônia torna-se mais de política que de polícia. Expressando mais diretamente, a questão é: “Que tipo de política e ou condições de mercado podem promover ou favorecer uma extração madeireira de baixo impacto com manejo florestal sustentável?”

Para responder a questão acima, não basta propor uma determinada linha de ação. Política governamental implica em escolhas que são feitas favorecendo determinados atores em detrimento de outros. Para lembrar o já cansado (e um pouco cínico) dito atribuído a Friedman, se não há almoço grátis, é preciso saber quem paga a conta. É necessário também entender a atividade madeireira como um determinado tipo de indústria. Esta indústria tem um padrão tecnológico de produção que pode ser diferenciado internamente por volume de investimento de capital fixo, por estado, e mesmo pelo tipo de ator que extrai e processa a madeira. é preciso

entender também se há alguma correlação entre este padrão estrutural da indústria e o padrão de extração e manejo dos estoques de madeira. Se esta correlação existe, é provável que escolhas por determinados tipos de políticas que não considerem a estrutura da indústria não funcionem como o esperado e a promoção de uma exploração “sustentável” de madeira nativa naufrague no Aqueronte das boas intenções.

Árvores, Madeira e Governança: um Problema Sócio-Econômico-Ecológico

A questão da exploração madeireira na Amazônia tem seguidamente suscitado controvérsias. O Brasil produz madeira de floresta para abastecer, em sua maior parte, o mercado interno. A demanda para esta madeira é indiferente a práticas de extração e manejo ambientalmente responsáveis. Os preços de boa parte da madeira fornecida para o mercado local são indiferentes em relação ao fato da madeira ter ou não sido extraída de forma predatória.

Por outro lado, para as madeireiras, praticar a exploração com técnicas de impacto reduzido e manejo implica em um acréscimo de custos que poucas estão dispostas a pagar, tendo em vista a indiferença dos preços para este tipo de madeira. Madeireiras que se atêm às restrições e custos impostos por práticas de manejo sustentável têm pouca ou nenhuma vantagem mercadológica para o fornecimento de seus produtos no mercado interno.

Aliado a isto está o fato de que as práticas de exploração predatória e/ou ilegal são fracamente coibidas, sendo a apreensão de madeira e as multas às madeirei-

ras, um aspecto periférico em relação ao volume de produção total de madeira da Amazônia.

Estes fatos configuram um nó para a questão da exploração madeireira sustentável na Amazônia. A persistirem as condições atuais, a indústria madeireira irá manter as práticas de extração predatória até a exaustão dos estoques de madeira na região. A questão que se põe então é: *Que tipo de condições subsidiárias podem produzir uma mudança no padrão de exploração da floresta pelas madeireiras levando a condições de exploração menos insustentáveis?*

Para responder esta questão é necessário abordar dois elementos estruturais que estão entrelaçados no problema. O primeiro elemento é a *racionalidade econômica que determina as decisões de produção das madeireiras*. Esta racionalidade está condicionada pela disponibilidade de estoques de madeira, pelos custos de produção (extração, transporte e processamento) e capital, e pelos riscos associados à atividade de exploração. O segundo elemento estrutural é o conjunto de condições que estabelece os limites para a atividade madeireira como um todo. É a este elemento que se chama de *condições subsidiárias*. Estas condições vão interagir com os processos de tomada de decisão dos madeireiros. A racionalidade econômica da decisão sobre a produção vai estar, então, condicionada por estas condições a que se chama neste trabalho de *ambiente* onde a madeireira está imersa. Ambiente é definido aqui como o conjunto de fatores externos que influem nas decisões de produção das madeireiras. Compõem este ambiente, no modelo implementado neste trabalho:

- a capacidade do Estado de fiscalizar e punir a exploração ilegal de madeira;

- a política de tributação aplicada à atividade;
- as características da demanda do mercado;
- o grau de concorrência no setor madeireiro;
- a disponibilidade de estoques madeiráveis.

Ao mesmo passo que o ambiente condiciona a decisão sobre exploração madeireira ele é transformado por estas decisões. Diferentes condições de exploração da floresta levam a diferentes trajetórias para a disponibilidade do recurso madeireiro.

A racionalidade econômica da decisão de produção da madeireira é condicionada e, em larga escala, condiciona o ambiente onde a madeireira está inserida. Esta racionalidade, porém, não pode ser reduzida a simples cálculo de riscos. A complexidade das interações e a incerteza determinada pelo ambiente impõem restrições à racionalidade do processo de decisão. Não é possível ao agente (neste caso, o madeireiro), em face da complexidade e da incerteza do ambiente, tomar decisões ótimas sobre a produção. Este agente, então utilizará alguma forma mais *fraca* de racionalidade que lhe permitirá evitar o custo de, não tendo nenhum ponto ótimo visível, não tomar decisão nenhuma. Esta *racionalidade fraca* permite ao agente estabelecer um “curso de ação” para as decisões de produção. A noção adequada a este tipo de abordagem é a noção de *estratégia*. Estratégia é o conjunto de decisões que o agente decide tomar para alcançar o máximo objetivo possível dadas as decisões que ele pode antever do conjunto dos outros agentes que, de alguma forma alteram ou influenciam os resultados que o agente pode obter. Os madeireiros, nas decisões

sobre a produção, definem suas *estratégias de exploração* do recurso. Os madeireiros têm duas *estratégias puras* possíveis. A primeira é a extração do recurso com práticas de manejo e ciclos de corte longos (a partir de 32 anos), chamada aqui de *Exploração Sustentável* (estratégia s_1). E a segunda é a extração de todo o recurso que maximize a rentabilidade da exploração no menor tempo possível, chamada de *Exploração Predatória* (estratégia s_2). Os agentes, na simulação, tentam encontrar valores satisfatórios para a produção madeireira combinando estas estratégias com o volume de madeira disponível para exploração.

Neste trabalho estuda-se os impactos de mudanças no ambiente onde as madeiras estão inseridas sobre as estratégias de exploração da floresta. As mudanças das estratégias de exploração podem ter duas fontes principais: *mudanças da política pública* em relação à exploração madeireira tanto diminuindo a rentabilidade do padrão de exploração vigente quanto aumentando a rentabilidade da exploração sustentável; *mudanças no mercado* que levem a uma diferenciação dos preços da madeira produzida em condições de manejo sustentável em relação à madeira explorada de forma predatória.

Em relação à ação do Estado, dois aspectos alternativos de política pública são analisados neste trabalho: o primeiro é o aumento da eficácia da repressão a práticas predatórias ilegais. Estuda-se a influência de um aumento das apreensões de madeira explorada ilegalmente sobre as estratégias de exploração praticadas pelos madeireiros. O segundo aspecto de política pública é a análise de condições de tarifação que incentivem a prática da exploração de baixo impacto com manejo

sustentável.

Quanto ao mercado, avalia-se quais os impactos que preços diferenciados para a madeira extraída com baixo impacto e manejo sustentável podem ter em relação às estratégias de exploração escolhidas pelos madeireiros.

Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é produzir um modelo de simulação multiagentes para avaliar como a capacidade de fiscalização do Estado, políticas alternativas de tributação e preços de mercado podem influenciar as estratégias de exploração e manejo de madeira em Rondônia.

Para a implementação do modelo de simulação elaborado para a tese foi construído, em *Smalltalk*, um *software* de simulação, chamado de *Sim2(ECO)* que permite a geração de cenários para a indústria madeireira.

Este *software* é aberto e adaptável para outros problemas de simulação de dinâmica do uso do solo na Amazônia.

Hipóteses

1. As condições de exploração (majoritariamente predatória e ilegal), a demanda do mercado (essencialmente interna indiferente às estratégias de exploração da madeira) implicam em ganhos maiores quando os agentes escolhem uma estratégia *predatórias* do que quando mantêm uma estratégia *sustentável* (exploração de baixo impacto com manejo florestal sustentável);

2. Políticas consistentes para a promoção da exploração sustentável de madeira passam pelo aumento de restrições e fiscalização (diminuindo o *payoff* de uma estratégia predatória) bem como por incentivos à escolha de estratégias de exploração sustentáveis tanto para as pequenas quanto para as médias madeireiras;
3. Preços de mercado diferenciados influenciam as escolhas dos madeireiros por práticas de exploração;

O Modelo Implementado

Foi desenvolvido um modelo que incorpora a noção de estratégia e permite estabelecer a relação entre estratégia e dinâmica agregada da exploração. Este modelo embute custos operacionais, custos tributários e preços diferenciados por tipo de estratégia de exploração (s_1 e s_2) e incorpora a capacidade do estado de punir a exploração ilegal de madeira. Estes elementos configuram um *arcabouço teórico* apropriado para avaliar os impactos de políticas de fiscalização e tributação bem como de diferentes condições de mercado sobre as estratégias de exploração das madeireiras.

Foi implementado um modelo de simulação que pode ser usado como uma ferramenta para subsidiar a análise de políticas públicas alternativas para a mudança da indústria madeireira para uma estratégia de exploração menos insustentável. Esta ferramenta incorpora os elementos do modelo teórico descrito acima e permite a construção de cenários para o comportamento dos madeireiros dadas diversas condições

de tributação, fiscalização e preços de mercado.

O Ambiente de Simulação Multiagentes

Para a implementação do modelo de simulação, foi construído um arcabouço de simulação multiagentes aberto e genérico, chamado de *Sim(2ECO)* e implementado em *Squeak Smalltalk*, que permite a execução dos cenários especializados e supondo o aprendizado dos agentes. Os agentes implementados derivam a sua capacidade de adaptação às mudanças das condições do ambiente à incorporação de um *Algoritmo Genético* como mecanismo de aprendizado.

Este é o primeiro modelo baseado em agentes adaptativos artificiais para a simulação da atividade madeireira na Amazônia. Este arcabouço incorpora a noção de estratégia adaptativa nas simulações, o que permite avaliar a evolução do comportamento dos agentes dadas as mudanças nas condições subsidiárias das suas funções objetivo. O arcabouço de simulação implementado mostrou-se uma ferramenta adequada para a representação e execução de modelos onde as interações entre os componentes se dão de uma forma dinâmica e complexa.

A estrutura do trabalho

A tese está dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo se discute a relação entre a complexidade dos problemas sócio-econômicos e a complexidade da sua modelagem e como esta complexidade dificulta a modelagem destes problemas. Apresenta-se também os elementos teóricos

que vão basear a abordagem de modelagem utilizada nesta tese e é proposta a noção de *racionalidade fraca* que é o componente teórico fundamental da modelagem dos agentes implementados no trabalho. Define-se os requisitos do modelo de agente adaptativo artificial utilizado na tese e se discute como a noção de utilidade que se integra com a noção de estratégia e como o comportamento estratégico é determinado e determinante do contexto (que se chama aqui de *ambiente*) onde o agente está inserido.

No segundo capítulo se discute o uso da simulação e modelagem computacional como uma abordagem possível para processos econômicos e alguns arcabouços de simulação multiagentes. Apresenta-se, também, a implementação da ferramenta de modelagem desenvolvida para este trabalho e o modelo de agente adaptativo artificial implementado na ferramenta de simulação. Inicialmente é discutido o uso da abordagem de simulação discreta como ferramenta de modelagem em economia, suas vantagens e desvantagens e as possibilidades abertas por esta abordagem *vis-a-vis* os dados existentes para o problema de pesquisa apresentado na tese. Após isto, são discutidos, também, os principais arcabouços de simulação multiagentes e as implementações de modelos que utilizam a simulação multiagentes em problemas de recursos de uso comum. Finalmente se apresenta o arcabouço de simulação desenvolvido para este trabalho e a implementação computacional do modelo de agente adaptativo com racionalidade limitada implementado para a simulação.

No terceiro capítulo se discute a atividade madeireira como um problema sócio-econômico-ecológico. Inicialmente discute-se o impacto da atividade madeireira o

desmatamento e suas características como um problema econômico. Resenha-se alguns modelos sobre desmatamento da Amazônia com foco especial sobre a atividade madeireira. Discute-se o modelo de Steve Stone sobre a indústria.

No quarto capítulo se apresenta o modelo implementado para a simulação multiagentes bem como a sua implementação computacional.

No quinto capítulo apresenta-se os dados coletados para a tese. A partir de dados secundários, apresenta-se um painel sobre a indústria madeireira em Rondônia e suas condições. Apresenta-se os resultados da pesquisa de campo realizada em Rondônia.

No sexto capítulo são construídos três cenários de simulação. As simulações executadas com o **Sim(2ECO)** têm os seus resultados apresentados. Os resultados e os aspectos teóricos e práticos associados ao modelo e ao simulador são discutidos.

1 Complexidade, Racionalidade, Estratégias e Agentes

Neste capítulo se discute a relação entre a complexidade dos problemas sócio-econômicos e a complexidade da sua modelagem e como esta complexidade dificulta a modelagem destes problemas. Apresenta-se também os elementos teóricos que vão basear a abordagem de modelagem utilizada nesta tese e é proposta a noção de *racionalidade fraca* que é o componente teórico fundamental da modelagem dos agentes implementados no trabalho. Define-se os requisitos do modelo de agente adaptativo artificial utilizado na tese e se discute como a noção de utilidade que se integra com a noção de estratégia e como o comportamento estratégico é determinado e determinante do contexto (que se chama aqui de *ambiente*) onde o agente está inserido.

1.1 A Complexidade dos Sistemas Sócio-econômicos e a Complexidade da Modelagem

A primeira questão que surge na modelagem de sistemas, quando se trata de problemas de larga escala, é o fato de que há um número muito grande de componentes heterogêneos destes sistemas que têm entre si um número muito grande de interações, que podem mudar no decorrer do tempo. Quando se tem muitos elementos com um número grande de interações torna-se crucial estabelecer o nível de descrição dos elementos dos sistemas (*Quais os elementos devem ser incluídos quais os não serão considerados significativos e, portanto, excluídos do sistema?*) e que interações entre estes elementos são relevantes para uma descrição coerente do comportamento que este sistema pode ter. *Em outras palavras a questão é qual a abordagem de modelagem adequada para sistemas com muitos elementos heterogêneos e um número muito grande de interações que mudam dinamicamente?*

Problemas sócio-econômicos podem ser considerados problemas complexos. Esta complexidade é derivada do fato de neste tipo de problema há um grande número de elementos heterogêneos interagindo de maneira dinâmica. Construir modelos que dêem conta, tanto das características dos seus elementos individuais, quanto de suas interações é das tarefas mais difíceis de quem lida com problemas sócio-econômicos. A construção de modelos nesta área deve levar sempre em conta o compromisso entre realismo e a complexidade da modelagem. Modelos mais realísticos tendem a ter um grau de complexidade maior. Isto é verdadeiro sobretudo quando se fala em modelos matemáticos e econométricos. Produzir modelos mais realísticos nem

sempre significa aumentar a relevância destes modelos para uma compreensão maior dos problemas enfocados.

O desenvolvimento da teoria e o desenvolvimento de novos instrumentos e métodos de observação e análise (sejam eles instrumentos no sentido físico, como um telescópio, ou métodos formais, como o cálculo diferencial) apresentam, na maioria das vezes, estreita relação. Os dados que os experimentos conduzidos com novos instrumentos eventualmente produzem podem lançar novas evidências, confirmando a teoria existente, mantendo-a dentro do contexto de ciência normal, na perspectiva de Kuhn (KUHN, 1978), ou ser incompatíveis com as expectativas determinadas pela teoria, o que pode levar a rupturas revolucionárias. Em ciências sociais, onde é constante a convivência de várias visões e conjuntos de métodos que, eventualmente, são incompatíveis entre si, a criação de instrumentos e métodos de análise tem sido sempre um problema espinhoso.

A dificuldade de modelar, sobretudo com abordagens matemáticas e econométricas, não pode impedir os pesquisadores de continuar pensando e propondo novos modelos e ferramentas de modelagem. A saída para o impasse associado ao compromisso entre realismo e complexidade pode passar pela construção de novos instrumentos de análise, o que também quer dizer a construção de novas ferramentas de modelagem. Estas ferramentas podem permitir a exploração dos problemas de forma nova, podem ajudar a compor, a partir de novas perspectivas, uma outra abordagem daquilo que se pode observar. Estas novas perspectivas podem produzir novas leituras e fazer avançar a compreensão que se tem da teia de interações e complexidades que

compõem o tecido do real.

Estas interações e complexidades tornam-se mais evidentes quando o foco é aproximado dos problemas típicos associados à questão do desenvolvimento da Amazônia. Pensar a sustentabilidade e o desenvolvimento em regiões com surtos de transformação provocados por movimentos populacionais intensos, como é o caso de Rondônia por exemplo, e onde grandes obras de infra-estrutura condicionam e afetam o uso do espaço (como em toda a Amazônia), implica em pensar em problemas onde as trajetórias das variáveis dificilmente podem ser previstas com significativa segurança por modelos econométricos tradicionais. É necessário também pensar na interação entre os atores do processo (governos estaduais e nacionais, trabalhadores, empresários nacionais e estrangeiros, ONGs, populações tradicionais, etc.) e em como estas interações (e as ações resultantes delas) impactam a região.

Um dos aspectos da construção de novas abordagens de modelagem é encontrar novos pontos de partida para a elaboração dos componentes dos modelos. Um ponto de partida possível é a modelagem da racionalidade dos agentes e do comportamento derivado desta racionalidade. Supor que os agentes têm um comportamento racional ou derivam suas decisões (e, portanto seu comportamento) a partir de alguma “racionalidade” não é uma novidade. Para que se possa aspirar a alguma previsibilidade nos modelos do comportamento de agentes econômicos é necessário supor alguma noção de *racionalidade*. A racionalidade do comportamento dos agentes é, então, a base epistemológica fundamental para a aspiração de algum grau de previsibilidade dos modelos sócio-econômicos.

1.2 Racionalidade, Utilidade e Estratégias

A discussão sobre a abordagem de modelagem utilizada aqui neste trabalho deve começar com uma definição da noção de racionalidade. Mais especificamente, deve-se estabelecer que noção de racionalidade se vai utilizar. Suposições sobre a racionalidade dos agentes sempre fizeram parte do arcabouço teórico básico dos modelos econômicos. Estas suposições, porém, devem se ater a dois compromissos básicos: Primeiro devem estar submetidas ao compromisso entre complexidade e realismo a que se aludiu acima. Modelos são, de alguma maneira, esforços para a redução da complexidade do mundo. Neste sentido, a atividade de modelagem tem sempre um conteúdo *reducionista*. Isto significa que a produção de modelos deve ter alguma possibilidade de descrever, de maneira *formalmente consistente* e *computacionalmente tratável* os sistemas observados. Por *formalmente consistente* denota-se o fato de que modelos baseados em algum sistema formal (uma linguagem) *não* podem ter *inconsistências lógicas*. Por *computacionalmente tratável* denota-se o fato de que modelos formais necessitam ter alguma forma de solução, seja esta solução analítica ou computacional. Este *grau de realismo* pode ser entendido com um compromisso entre a manutenção de coerência formal da previsão do comportamento dos agentes (dada pelo modelo) e a coerência com os comportamentos observados dos agentes.

Estes comportamentos, como se disse acima, são resultado das decisões tomadas pelos agentes. E o que baseia estas decisões, para cada agente é um conjunto de crenças, preferências, intenções, desejos (DENNET, 1987) que são diferentes para cada agente, mas estão condicionados, por um lado, pelos mecanismos invariantes

das suas estruturas de raciocínio (WAZLAWICK, 1993; DRESCHER, 1991) e, por outro pelas estruturas sociais.

1.2.1 Racionalidade Forte e Racionalidade Fraca

Para que os modelos possam ser adequados a um tratamento formal consistente é necessário simplificar as suposições sobre a racionalidade dos agentes. Este é um caminho trilhado principalmente por modelos econômicos como os de expectativas racionais (SARGENT, 1993; MACHINA, 1987) e outros modelos de inspiração neoclássica. A maior simplificação possível para a racionalidade dos agentes é supor que eles têm conhecimento completo do mundo, isto é: os agentes conhecem todos os aspectos do mundo que podem afetá-los. Isto implica também que os agentes têm capacidade para avaliar todas as possibilidades de evolução do ambiente, isto quer dizer que o agente precisa ter uma capacidade de processamento suficiente para tratar todas as possibilidades de evolução dos estados do mundo que ele observa (e que o afetam).

No limite, esta capacidade de processamento deve ser infinita. Tendo conhecimento completo do mundo, capacidade de processamento infinita, e uma função qualquer de preferências (um agente pode preferir, por exemplo um salário maior a um salário menor) o agente está em condições de decidir qual é o curso *ótimo* de ação. Ou seja, o agente decidirá sobre a opção que lhe *maximize*, entre todos os resultados possíveis, o resultado esperado. Este agente *perfeitamente racional* é, no entanto, inadequado para a maior parte dos problemas relevantes de modelagem de processos de decisão. As características usuais, para a maioria das decisões econômicas são:

informação inexistente ou incompleta, restrições no tempo para decidir sobre um curso de ação e falta de capacidade de processamento para avaliar todos os cursos de ação possíveis. Portanto, uma abordagem mais adequada de modelagem para a racionalidade dos agentes implica em considerar estas restrições.

Um caminho possível neste sentido é relaxar as suposições sobre a racionalidade dos agentes. Este é o caminho estabelecido por Simon (SIMON, 1981), a noção de *racionalidade limitada*. Os agentes, devido à ausência ou imprecisão da informação a que têm acesso, ou à incapacidade de processar todas as informações relevantes para a tomada de decisão, não têm como chegar a uma *solução ótima* para os seus problemas de decisão. Isto porém não os impede de tomar decisões. O critério para estas decisões deixa de ser a otimização dos resultados (o máximo ganho possível) para ser o alcance de resultados satisfatórios (*satisficing*). Um modelo que considere a racionalidade dos agentes de maneira mais limitada parece ser um modelo menos irrealístico. Modelos deste tipo implicam, porém, em maior esforço na sua solução. Para Sargent (SARGENT, 1993, p. 2):

Ironically when we economists make the people in our models more 'bounded' in their rationality and more diverse in their understanding of the environment, we must be smarter, because our models become larger and more demanding mathematically and econometrically. ¹

Modelos que implementam estas restrições na racionalidade dos agentes vão,

¹ "Ironicamente, quando nós economistas fazemos as pessoas em nossos modelos mais limitadas na sua racionalidade e com uma compreensão mais diversificada do ambiente, nós precisamos ser mais espertos, visto que nossos modelos se tornam maiores e matemática e econometricamente mais custosos."

então, ser muito mais complicados de solução mais difícil.

Estas duas noções de racionalidade mostram dois pontos na significação deste termo. Para marcar os dois extremos, explicitar-se-á as noções forte e fraca de racionalidade:

1. na noção *forte* de racionalidade tem-se agentes perfeitamente racionais
 - com conhecimento completo do mundo,
 - com capacidade de processamento infinita,
 - que tomam decisões ótimas (no sentido matemático do termo);

2. na noção *fraca* de racionalidade tem-se agentes com racionalidade limitada
 - com conhecimento imperfeito ou incompleto mundo,
 - com capacidade de processamento limitada ²,
 - que precisam decidir em um determinado intervalo de tempo alguma solução sub-ótima (*satisficing*, na perspectiva de Simon (SIMON, 1981)).

Apesar destas diferenças na categorização da memória, capacidade de processamento e da conseqüente habilidade de encontrar ou não soluções ótimas para os problemas de decisão, um princípio pode ser considerado: os agentes tomam a decisão que produz o melhor retorno possível, dadas as alternativas plausíveis. “Melhor retorno possível” supõe uma *ordem de preferências* dentro de um conjunto de

²Isto quer dizer que a capacidade do agente será finita. A observação de problemas com alta complexidade computacional permite dizer que a maior parte dos problemas de decisão que o agente vai enfrentar são insolúveis num tempo computacional razoável

situações possíveis. O que determina esta ordem de preferências é o que os economistas costumam chamar “benthanianamente” de função utilidade. Funções utilidade permitem, dado um conjunto de alternativas, a construção de uma *ordem parcial* para estas alternativas e a decisão sobre a alternativa “mais desejável”.

1.2.2 Utilidade e Funções Utilidade

A noção de utilidade como a fonte fundamental dos procesos de decisão humanos remonta aos princípios da economia política inglesa. O Utilitarismo de Bentham (BENTHAM, 1979, p.6), já está exposto no primeiro parágrafo dos seus *princípios*:

A natureza colocou o gênero humano sob o domínio de dois senhores soberanos: a *dor* e o *prazer*. Somente a eles compete apontar o que podemos fazer, bem como determinar o que na realidade faremos.

Esta noção de que nos movemos para conseguir maximizar nossos interesses está também em Adam Smith na sua *Riqueza das Nações*. Mas o desenvolvimento moderno de uma teoria que incorporasse formalmente (numa base axiomática) a questão da decisão sobre incerteza, dadas as utilidades esperadas, baseadas numa função utilidade, só aconteceu com o texto fundador da teoria dos jogos de von Neumann e Morgenstern (VON NEUMANN; MORGENSTERN, 1944). Uma função utilidade presume alguma função de antecipação. Os agentes decidem sobre valores que eles esperam receber. Qualquer decisão, então se dá, não sobre ganhos presentes, mas, sobre a antecipação de ganhos futuros. A literatura de teoria dos jogos e da utilidade esperada chama a estes ganhos possíveis de *loterias*. A estes ganhos pode-

se então atribuir alguma probabilidade.

Esta suposição de que há probabilidades atribuíveis às loterias implica que o agente tem conhecimento completo de todas as possibilidades de ocorrência dos eventos sobre os quais ele está decidindo; isto é, dado um conjunto X ³ de loterias simples $\{l_x\}_{x=1}^X$ há um conjunto de probabilidades $\{\alpha_x\}_{x=1}^X$ onde $\sum_{x=1}^X \alpha_x = 1$ (FONSECA; USSHER, 2004). Dizer que a soma das probabilidades de ocorrência das loterias será igual a 1 é consistente com o axioma fundamental da teoria das probabilidades, de que as probabilidades de ocorrência de todos os eventos possíveis são aditivas e sua soma necessariamente não pode ultrapassar 1⁴. O conjunto X contém todos os eventos possíveis sobre os quais o agente deve decidir, portanto a incerteza se reduz a calcular as taxas com as quais ele pode esperar a ocorrência de cada evento. Sendo o conjunto X o meu *mundo*⁵, meu conhecimento sobre este mundo é *completo*. Portanto este agente tem conhecimento completo do mundo, o que vai nos remeter à primeira condição necessária para o agente com *racionalidade forte*.

John Nash, no seu famoso artigo *The Bargaining Problem* (NASH, 1950) apresenta a uma definição sintética para utilidade e função utilidade que se resumirá aqui. Nash começa apresentando o fato de que utilidade tem como componente fundamental o conceito de *antecipação*. Antecipação, se refere a uma probabilidade de ocorrência de um evento dentro universo de possibilidades do agente. No

³ X é o meu *universo de possibilidades*

⁴A isto se tem chamado recentemente de *probabilidades precisas* (KLIR, 1999). Uma boa referência sobre este assunto é <http://www.sipta.org>

⁵i.e. Todos os eventos que podem afetar a minha decisão

exemplo, de Nash, se um agente tem a possibilidade de receber um *Buick* ou um *Cadillac* no dia seguinte (ele tem certeza que receberá um dos dois), este agente terá, então, a antecipação de $\frac{1}{2}$ Buick e $\frac{1}{2}$ Cadillac. Isto é: sendo a minha probabilidade (p) $0 \leq p \leq 1$ e o meu universo de possibilidades restrito a dois valores conhecidos A e B (as antecipações dos agentes) ⁶ então, a antecipação do agente para a ocorrência de todos eventos conhecidos será $pA + (1 - p)B$ sendo p a probabilidade de ocorrência do evento A e $1 - p$ a probabilidade de ocorrência do evento B .

As suposições feitas por Nash para construir a função utilidade dos indivíduos, são:

1. Para duas antecipações possíveis um indivíduo pode decidir qual a melhor ou se as duas são equivalentes. Isto é, um indivíduo pode construir uma *ordem parcial* para as suas antecipações;
2. Esta ordem é transitiva. Ou seja, dadas as antecipações A , B e C , se A é melhor que B então, A é melhor que C ;
3. Um agente não faz diferença entre qualquer combinação de probabilidade dois conjunto de antecipações igualmente desejáveis;
4. Se A , B e C são transitivos e A é melhor que C , então há uma combinação de A e C que é pelo menos tão desejável quanto C . Isto indica que a função de utilidade a ser construída é contínua.

⁶Formalmente tem-se que o conjunto X é: $X = \{A, B\}$ onde A e B são elementos de X

5. Se $0 \leq p \leq 1$ e A e B são igualmente desejáveis, então $pA + (1 - p)C$ e $pB + (1 - p)C$ são também igualmente desejáveis. A e B são, neste caso, completamente substituíveis em qualquer ordenamento produzido pela função.

Isto permite então formalizar uma *função utilidade*. Sendo X o conjunto de todos os eventos possíveis que o agente antecipa, então o agente pode estabelecer uma função utilidade (u) que associa este conjunto X a valores definidos no conjunto dos números reais \mathbb{R} . Mais formalmente tem-se a função:

$$u : \Delta(X) \longrightarrow \mathbb{R} \tag{1.1}$$

Cada utilidade será uma antecipação que pode ser diferente para cada agente. Não há nenhuma restrição para a existência de mais de uma função utilidade. Isto quer dizer que cada agente terá a sua função utilidade cada uma delas será independente da outra.

As decisões dos agentes, porém, não são independentes umas das outras. Elas são, em sua maioria, interativas. Os processos de decisão que ocorrem na maioria das situações, normalmente envolvem mais de um agente. O processo de troca de mercadorias numa economia qualquer, por exemplo, envolve ao menos dois agentes. Então as decisões interativas são a regra. Isto significa que é importante para cada agente estabelecer algum “curso de ação” no processo de decisão que considere, de alguma maneira o(s) outro(s) agente(s) envolvido(s). Este curso de ação é a *estratégia* do agente.

1.2.3 A Noção de Estratégia

Estratégia define então um conjunto de ações que um agente pode executar em algum processo de interação. Especificamente para a teoria dos jogos, uma estratégia é um conjunto de ações (ou *movimentos*) que um jogador executa num jogo. Estas estratégias devem ser completas, isto é definir os planos de ação dos agentes para todos os movimentos do jogo. Em um caso de um jogo simples com informação completa e movimentos simultâneos (como o dilema do prisioneiro) ⁷ uma estratégia de um jogador vai ser apenas a ação que ele vai escolher. No caso do dilema do prisioneiro, cada jogador tem duas estratégias possíveis (confessar ou não-confessar). Já num “jogo da velha” uma estratégia deve considerar todos os cursos

⁷O dilema do prisioneiro é um jogo que tem (POUNDSTONE, 1993) as seguintes características:

1. Dois prisioneiros (A e B);
2. Cada prisioneiro tem duas estratégias possíveis (D - confessar e C - Não-confessar)
3. Se o prisioneiro A confessar (escolher a estratégia C) e o prisioneiro B não-confessar (escolher a estratégia C). O prisioneiro A diminui a sua pena e o prisioneiro B tem a pena máxima.
4. Se nenhum dos dois prisioneiros confessar os dois recebem pena mínima
5. Se os dois confessarem a pena para cada prisioneiro será menor do que aquela dada para o prisioneiro que não confessar na situação 2

Este dilema pode ser expresso na seguinte matriz de payoffs na forma normal:

Prisioneiro B	
Prisioneiro A (Ia, Ib)	Não Confessar (C) Confessar (D)
Não Confessar (C)	3, 3 0, 5
Confessar (D)	5, 0 1, 1

No caso mostrado acima, a estratégia “não confessar” resulta em um ganho para os dois prisioneiros somente se ambos a escolherem Isto é, os prisioneiros devem cooperar. No caso do dilema, como não há possibilidade de coordenação um dos prisioneiros pode decidir confessar, enquanto outro, não. Isto dá pena máxima para aquele que escolher a estratégia C. Isto implica que, como os prisioneiros não conhecem a decisão um do outro a escolha é aquela que minimiza as perdas, supondo que o outro prisioneiro fará o mesmo. Então a solução para o dilema é: os dois prisioneiros escolherem a estratégia “Confessar (D)” que minimiza a possibilidade de perdas no caso de estratégias estritamente dominantes. A solução do dilema do prisioneiro é também um equilíbrio de Nash.

possíveis de ação num jogo. Uma estratégia para um jogo como esse então deve considerar todas as possibilidades de movimentos de cada jogador e prever o curso de ação para cada uma delas. Isto leva a problemas de complexidade computacional dos jogos.

Descobrir estratégias ótimas em jogos, como no xadrez, que é um jogo de soma zero onde a informação é completa e todos os movimentos possíveis são teoricamente antecipáveis está muito acima da capacidade computacional de qualquer pessoa ou computador que atualmente se possa imaginar. O primeiro problema que se deve enfrentar, então é que mesmo tendo todas as informações necessárias para produzir uma estratégia completa para um jogo, os agentes podem não ter a capacidade computacional para processá-lo. Ou seja, não é possível, para os agentes, encontrar uma solução ótima para o jogo mesmo sabendo que ela pode existir. Além disto, a maioria dos problemas de decisão relevantes em economia é ainda de uma classe mais alta de incerteza. Para estes problemas, a informação importante para os processos de decisão é *incompleta*, isto é: os agentes não conhecem as *regras* do jogo (HARSANYI, 1967). Então não há como um agente prever um curso ótimo de ação para este jogo sem, de alguma maneira, antecipar qual seria o curso de ação dos outros agentes. Se um agente não conhece as funções utilidade dos outros agentes que participam do jogo não é possível estabelecer uma previsão sobre uma estratégia viável sem que isto leve a uma regressão infinita. A incompletude de informação, no modelo de Harsanyi pode ter três aspectos:

1. Os jogadores não conhecem a *função de saída física* Y do jogo, que especifica

a saída física $y = Y(s_1, s_2, \dots, s_n)$ dos outros agentes, produzida por cada combinação de estratégias $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ dos jogadores.

2. Os jogadores podem não conhecer as *funções utilidade* - U_i deles ou dos outros jogadores que especificam o retorno (*payoff*) de $u_i = U_i(y)$ que um dado jogador deriva de uma saída física possível (y).
3. Os jogadores não conhecem o *espaço de estratégias* dos outros S_i , isto é, eles não conhecem o conjunto de todas as estratégias s_i (puras ou mistas) disponíveis para os diversos jogadores i .

Qualquer uma destas três condições implica no fato de que o jogador não tem como decidir, a priori, dentre o conjunto de estratégias à sua disposição, qual é a *estratégia ótima* para aquele jogo. Isto impõe ao agente estabelecer suposições sobre qual o conjunto de *estratégias possíveis* à disposição dos outros agentes no jogo. Para que estas suposições não levem a uma recursão infinita como aludiu-se acima, Harsanyi (HARSANYI, 1967) propõe como solução para este problema a redução do jogo de informação incompleta (o que ele chama de *I-jogo*) para um jogo de informação completa (*C-jogo*). Esta operação se faz utilizando probabilidades subjetivas para as funções de distribuição de probabilidades dos agentes. A suposição subjacente ao modelo é que os agentes conhecem a distribuição de probabilidade conjunta dos retornos esperados mas um agente não conhece algum aspecto dos elementos que baseiam a decisão dos outros agentes. As suposições necessárias para reduzir um jogo com informação incompleta para um jogo com informação completa são: a consistência mútua das percepções dos agentes e a ausência de qualquer

limitação de capacidade computacional destes agentes. O que nos leva, novamente, à *racionalidade forte*.

1.2.4 Interação, Complexidade e Jogos

A suposição da racionalidade forte é uma condição necessária para garantir a consistência do modelo. Este fato é basicamente determinado pelos requisitos de um desenvolvimento formal para a abordagem teórica, o que impõe dificuldades para a modelagem de processos concretos de decisão que estão baseados em uma racionalidade fraca e, eventualmente, como uma série de resultados experimentais têm demonstrado, são inconsistentes com uma noção probabilística (mesmo bayesiana) de comportamento racional (TVERSKY; KAHNEMAN, 1974; KAHNEMAN; TVERSKY, 1979).

Não parece haver, portanto, nenhuma razão empírica plausível para supor que os agentes cheguem a modelos ótimos para o funcionamento de um mercado qualquer, ou que suas percepções sejam complementares (mutuamente consistentes), ou que a capacidade para tratar todas alternativas possíveis seja infinita. Os motivos para estas suposições simplificadoras parecem estar mais ligados à elegância dos modelos e à possibilidade de encontrar soluções para os sistemas de equações.

Suposições mais sofisticadas para o comportamento dos agentes têm um inconveniente fundamental: uma boa parte delas são de difícil solução ou mesmo impossíveis de resolver com os métodos atuais. Quando se supõe que os agentes têm informação incompleta, baixa capacidade computacional, cometem erros sistemáticos e têm ca-

pacidade de aprendizado, os modelos que se pode derivar daí fogem sempre de tratamentos “equilibradas”, pois geralmente têm sua base em equações não-lineares que freqüentemente levam a comportamentos extremamente complexos quando executados.

Supor uma racionalidade mais restrita (racionalidade fraca) para os agentes, longe de ser uma simplificação, pode aumentar enormemente o grau de complexidade dos modelos. Supor informação incompleta e capacidade de aprendizado implica em modelos onde o conjunto de soluções possíveis para os agentes varia no tempo (ao menos enquanto eles estão aprendendo). Embora seja possível pensar a existência de conjuntos de soluções estáveis para modelos evolucionários onde os agentes têm uma racionalidade fraca, estas soluções normalmente não existem para a maior parte dos modelos, especialmente para aqueles com relevância econômica (SAMUELSON, 1997, p.37).

Como então combinar estas suposições sobre racionalidade fraca e capacidade de aprendizado em algum arcabouço formalmente consistente, ou, ao menos empiricamente razoável? Usando como ponto de partida algumas das idéias da teoria dos jogos, especificamente os desenvolvimentos feitos a partir do trabalho de Robert Axelrod (AXELROD, 1984, 1997b) se discutirá a implementação de um agente com racionalidade limitada e capacidade de aprendizado, que possa ser adequado ao tratamento de problemas sócio-econômico-ecológicos.

1.3 Teoria dos Jogos, Agentes e Sistemas Multi-agentes

Para Rapoport (RAPOPORT, 1999, p. 77) a teoria dos jogos precisa ser entendida como uma estrutura matemática que está interessada “*nos princípios gerais que governam a estrutura lógica do conflito estratégico*”. É importante estabelecer aqui o limite que tem a teoria dos jogos em relação a explicações mais genéricas sobre padrões observados de comportamento quando da tomada de decisões estratégicas em situações de conflito. A teoria dos jogos está fortemente baseada em dois princípios básicos (SAMUELSON, 1997, pp 1-3): o primeiro é que as pessoas decidem motivadas por um *conjunto estável de preferências* e o segundo é que elas *agem estrategicamente*. Apesar destes dois princípios serem fortemente ancorados em evidências, não há uma transição simples entre o “*comportamento observado*” das pessoas e o comportamento previsto por modelos ancorados na teoria dos jogos.

1.3.1 Estratégias, Aprendizado e Evolução

Para resolver teoricamente os modelos é necessário produzir, como foi dito acima, suposições suficientemente *generalizantes* que os simplifiquem para torná-los operacionais. Este requisito de simplicidade para que se possa produzir soluções (equilíbrios estáveis, por exemplo), impõe porém, alguma perda de capacidade explicativa para o modelo. Supor agentes com racionalidade forte pode tornar o problema da tomada de decisão, como modelado pela teoria dos jogos, restrito a um conjunto menor de problemas, essencialmente em decisões onde há um número de variáveis pequeno o

suficiente para que os agentes possam produzir algum tipo de *escolha ótima*. Apesar disso, jogos como o dilema do prisioneiro têm sido largamente usados como um meio de investigar problemas complexos de decisão em situações de conflito, mesmo situações como a *tragédia dos comuns* (HARDIN, 1968) têm aproveitado de uma abordagem baseada na teoria dos jogos (HARDIN, 1984), e modelado este problema (chamado também de *dilema dos comuns*) como um tipo específico de dilema do prisioneiro.

Outro campo importante, diretamente relacionado como o dilema dos comuns é a possibilidade de alcançar cooperação em grupos com interesses conflitantes (AXELROD, 1997b; BOWER; GARBER; WATSON, 1996; CROWLEY, 1996) muitos destes modelos têm sido usados em “*aplicações do mundo real*”. De fato, boa parte do desenvolvimento que a teoria dos jogos teve na corporação RAND foi derivada da sua capacidade de explorar dilemas em política (POUNDSTONE, 1993). O desenvolvimento dos conceitos de estratégia dominante (VON NEUMANN; MORGENSTERN, 1944) e de equilíbrio de Nash (NASH, 1997, 1950, 1953) deu à teoria dos jogos a consistência teórica necessária para desenvolver soluções para problemas em que um jogo pode ser jogado iterativamente um número finito de vezes. A idéia de um equilíbrio com estratégias mistas, derivada da prova de Nash, permite pensar situações onde posições de equilíbrio são encontradas com alguma combinação de dois (ou mais) tipos de estratégias.

O desenvolvimento das perspectivas teóricas abertas por Nash levou à consideração de situações de informação incompleta (HARSANYI, 1967; SELTEN, 1975)

e ao desenvolvimento de todo um novo conjunto de jogos denominados de Jogos Evolucionários (POUNDSTONE, 1993), (KUHN, 1997). O trabalho pioneiro ligando evolução e equilíbrio, usando um arcabouço da teoria dos jogos foi feito por Maynard Smith e Price (MAYNARD-SMITH; PRICE, 1973; MAYNARD-SMITH, 1982); estes autores utilizaram a noção de *Estratégia Evolucionariamente Estável (EEE)* para pensar processos evolucionários biológicos. A idéia por trás de estratégias evolucionariamente estáveis é que, em sistemas dinâmicos (como populações de predadores e presas co-evoluindo, por exemplo) processos evolucionários (por cruzamento e mutação, por exemplo) podem permitir às populações encontrar estados estacionários onde qualquer comportamento desviante (produzido por uma mutação, por exemplo) tende a desaparecer, quando um equilíbrio estável é estabelecido (SAMUELSON, 1997, pp 17-21). Há uma larga bibliografia sobre EEE que vem crescendo nos últimos anos, (CRESSMAN, 1996; SCHOOMBIE; GETZ, 1998; WEIBULL, 1998; TANG, 2001; VINCENT; CRESSMAN, 2000; BINMORE; SAMUELSON, 2001). O conceito de EEE tem sido aplicado em vários campos, seu maior sucesso tem sido na biologia evolutiva. Outro desenvolvimento parcialmente derivado da aplicação desta perspectiva evolucionária e do conceito de EEE tem sido a idéia de que estratégias estáveis podem ser um resultado do processo de interação entre agentes em um sistema social qualquer. O exemplo mais marcante é o trabalho de Robert Axelrod (AXELROD, 1984, 1997b). Axelrod promoveu no início dos anos oitenta um *torneio* onde diversos tipos estratégias (implementadas em programas de computador) competiram entre si num jogo do tipo *Dilema do Prisioneiro*. Um resultado extremamente interessante, derivado deste torneio é que a estratégia que o venceu

era extremamente simples. Estratégias do tipo *Tit-for-Tat* (coopera na primeira jogada e após isso, repete o que o oponente fez) têm provado ser extremamente robustas em jogos do tipo dilema do prisioneiro iterado. Embora estas estratégias não sejam uma EEE para o dilema do prisioneiro (SAMUELSON, 1997, pp. 20-21), os resultados derivados deste estudo tiveram largas conseqüências teóricas para o campo.

Um desenvolvimento importante dos estudos de Axelrod e da idéia de que se pode utilizar autômatos finitos (RUBINSTEIN, 1986) para representar estratégias é que é possível simular a evolução destas estratégias utilizando algum tipo de algoritmo adaptativo. Algoritmos Genéticos (HOLLAND, 1975) são a escolha mais comum para este tipo de abordagem e têm sido utilizados em uma larga quantidade de trabalhos que utilizam as idéias da teoria dos jogos evolucionários como base para a produção de experimentos computacionais que modelam problemas sócio-econômicos (HOLLAND; MILLER, 1991), (MILLER, 1996), (ARTHUR; DAVID A LANE, 1996), (AXELROD, 1997b). Esta nova abordagem encontrou um campo fértil na perspectiva aberta por uma nova área na inteligência artificial: *sistemas multiagentes*. É possível dizer que sistemas multiagentes e algoritmos evolucionários são campos onde os desenvolvimentos teóricos influenciam-se mutuamente. De fato, parte dos autores como Holland, Miller, Brian-Arthur e Axelrod têm utilizado a idéia de Agentes Adaptativos Artificiais (HOLLAND; MILLER, 1991; HOLLAND, 1995) como uma metáfora para tratar uma grande classe de problemas onde indivíduos co-evolvem em rede de interações fracamente acoplada, este tipo de processo

é chamado por Holland de *redes não-lineares adaptativas* (HOLLAND, 1988, 1995; ARTHUR, 1997).

A idéia de processos não lineares (como indivíduos num ecossistema por exemplo) adaptando-se e evoluindo a partir das suas interações é extremamente sedutora como uma descrição mais genérica para toda uma classe de processos complexos encontrados na natureza e em sistemas sócio-econômicos (como indústrias num oligopólio), a sua solução formal, porém ainda é uma questão não resolvida. O desenvolvimento da abordagem de agentes adaptativos artificiais surgiu então como uma alternativa para desenvolver estudos deste tipo de processo. Embora ainda não seja possível encontrar soluções formais para este tipo de problema é possível produzir um conjunto significativo de experimentos computacionais, que permitam encontrar resultados estatisticamente relevantes e validar estes resultados com dados observados. Este tipo de procedimento é comum em modelos econométricos e será utilizado para a abordagem desenvolvida nesta tese.

1.3.2 Complexidade e Simulação Multiagentes

Uma abordagem possível para o modelo de racionalidade limitada é o uso de *simulação computacional* para a definição do comportamento dos agentes. Uma técnica possível para implementar esta abordagem considerando a interação entre os agentes é o uso de *simulação multiagentes*. Uma motivação para o uso deste tipo de abordagem para problemas sócio-econômicos é que o tratamento formal tradicional para problemas complexos estabelece um conjunto extremamente restritivo de suposições para o comportamento dos agentes. As abordagens que usam cálculo

diferencial ou sistemas de equações (lineares ou não) precisam supor, (por exemplo, em modelos de expectativas racionais), a consistência mútua das percepções dos agentes para encontrar soluções para os seus sistemas (SARGENT, 1993).

A recente integração de técnicas de inteligência artificial com uma abordagem “distribuída” para a modelagem de problemas sócio-econômicos, cunhou o campo da Modelagem Baseada em Agentes Adaptativos Artificiais (HOLLAND, 1995; ARTHUR; DAVID A LANE, 1996; GILBERT; TROITZSCH, 1999; RIVERO, 1999). Um dos primeiros trabalhos nesta área, combinando algoritmos adaptativos⁸ e teoria dos jogos foi a implementação do dilema do prisioneiro iterado feita por Robert Axelrod (AXELROD, 1984). O uso de *Agentes Adaptativos Artificiais* como uma metáfora para a modelagem de problemas sócio-econômicos tem crescido desde o início da década de 1990. Seminários como “*The Economy as an Evolving Complex System II*” (ARTHUR; DAVID A LANE, 1996) têm trazido alguns estudos que combinam abordagens baseadas em agentes adaptativos com elementos da teoria do jogos (BLUME, 1997; DARLEY; KAUFFMAN, 1997; LANE; MAXFIELD, 1997; LINDGREN, 1997). A maioria das análises utiliza modelos baseados em agentes para implementar as simulações e jogos evolucionários como ferramenta teórica para a interpretação dos resultados. O uso de técnicas de simulação multiagentes, combinado com a teoria dos jogos evolucionários tem sido usado para tratar problemas complexos e enfrentar as dificuldades de produzir previsões sobre dinâmicas

⁸Chama-se aqui de *algoritmos adaptativos* toda a classe de algoritmos utilizados para a *simulação de aprendizado* ou para a *descoberta de conhecimento* no campo da inteligência artificial. Estão incluídos nesta classe de algoritmos as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos, os algoritmos de têmpera simulada e os algoritmos que utilizam métricas de similaridade para a identificação de casos típicos (raciocínio baseado em casos) e algoritmos bayesianos.

estruturais de médio e longo prazos em problemas sócio-econômicos baseados nos padrões de interação e nas funções utilidade dos agentes. Um dos problemas desta combinação é que as restrições formais da teoria dos jogos impõem um conjunto de suposições sobre a tomada de decisão e o comportamento dos agentes que implica numa menor flexibilidade na implantação de modelos.

Agentes artificiais foram utilizados nos trabalhos citados acima como uma técnica para produzir um mapeamento ⁹ mais preciso de problemas complexos de larga escala. A combinação desta abordagem estrutural com algoritmos adaptativos tem mostrado em uma série de trabalhos (BINMORE, 1998; BOUSQUET, 2001a; COHEN; RIOLO; AXELROD, 2001; DORAN, 2001; RESCHKE, 2001) ser uma técnica consistente para encontrar posições de equilíbrio estáveis em problemas de compreensão da dinâmica de mercados de ações, da evolução de padrões de mercado e mesmo para a modelagem de problemas clássicos em uso de recursos naturais como o problema dos recursos comuns de Hardin (AXELROD, 1997b; BALZER; BRENDEL; HOFFMAN, 2001; BOUSQUET, 2001a, 2001b; DEADMAN; SCHLAGER; GILBERT, 2001).

O elemento que pode unir estas duas perspectivas é a noção de *estratégia*. Estratégia é uma noção consistentemente construída na teoria dos jogos e pode ser modelada como um autômato finito (AXELROD, 1984; RUBINSTEIN, 1986; MILLER, 1996), o que permite a sua representação em um algoritmo adaptativo. A idéia de estratégias evolucionariamente estáveis (MAYNARD-SMITH; PRICE, 1973; MAYNARD-SMITH, 1982) também está bem estabelecida na teoria dos jogos para fornecer um conjunto consistente de *insights* e de instrumentos teóricos para tratar o

⁹Relação entre Domínio e Imagem em uma função qualquer.

problema da evolução do modelo e para encontrar equilíbrios possíveis em situações simuladas.

A noção de *função utilidade* pode servir como instrumento para avaliar os *payoffs* dos agentes e para dirigir a evolução das estratégias é a *função utilidade*. Funções utilidade, que são um elemento básico da teoria econômica, têm servido como um elemento da construção de agentes adaptativos artificiais e para dirigir problemas de busca e de tomada de decisão usando técnicas de Inteligência Artificial (RUSSELL; NORVIG, 1995).

A questão a responder agora é: que modelo específico de agente pode ser implementado para dar conta destes requisitos de interação, aprendizado e racionalidade limitada? Este tipo de agente é um Agente Adaptativo Artificial com Racionalidade Limitada.

1.3.3 O Agente Adaptativo Artificial para Simulação Econômica

Rivero (RIVERO, 1999) define as características que um agente artificial adequado para a simulação econômica deve ter da seguinte maneira:

1. Racionalidade Limitada que implica em capacidade de categorização de situações e capacidade de aprendizado;
2. Função Utilidade;
3. Capacidade de antecipação das situações do mundo, i.e. uma função que permita a formação de expectativas;

4. Capacidade de comunicação;

Abaixo detalha-se como estas características são implementadas no agente.

Racionalidade Limitada- O primeiro aspecto a modelar no agente é a noção de racionalidade limitada. Isto significa que o agente terá limitações de capacidade de processamento e não conhecerá as estratégias dos outros agentes, a menos que estas sejam explicitadas pelas ações dos outros. Isto implica que os modelos a serem implementados no ambiente de simulação *não precisam ter* soluções formais. As soluções de equilíbrio encontradas serão necessariamente resultados de processos de adaptação. Para isto é necessário, então a implantação, no agente de algum algoritmo adaptativo. A escolha deste algoritmo aqui recai sobre um algoritmo genético. As justificativas desta escolha serão explicitadas no próximo capítulo. Os algoritmos genéticos têm sido utilizados como principal algoritmo para a simulação de processos de aprendizado em agentes que implementam racionalidade limitada e têm provado ser robustos em problemas de otimização de alta dimensionalidade. O algoritmo genético é utilizado para “evoluir” o conjunto de *estratégias* do agente. Não há nenhuma restrição sobre o grau de completude que estas estratégias podem ter; isto é, as estratégias não precisam estar ancoradas em nenhuma previsão completa de todas as possibilidades de ocorrência de eventos que podem afetar os agentes. A única restrição necessária é que as estratégias determinam completamente o comportamento do agente. Ou seja, o agente *sempre* vai selecionar alguma estratégia para qualquer situação. O agente tem, portanto um conjunto de estratégias que ele vai necessariamente escolher utilizando o algoritmo genético. O resultado de

cada estratégia (o seu *payoff*) dado pela função utilidade do agente é usado como *fitness* para a evolução destas estratégias nos processos de cruzamento executados pelo algoritmo genético.

Função Utilidade - A função utilidade do agente é modelada a partir dos dados da literatura e das observações de campo e implementada como função de *fitness* do algoritmo genético. No caso da implementação de que trata neste trabalho, o ponto de partida desta função é o trabalho de Steve Stone (STONE, 1997) no seu estudo sobre a indústria madeireira no Pará.

Capacidade de Antecipação - Como as estratégias são estabelecidas *a priori*, o agente utiliza a noção de *utilidade esperada* para encontrar o grau de utilidade que servirá para a seleção das estratégias. Esta função estará baseada nas expectativas do agente sobre os resultados de suas ações. Isto necessariamente incluirá alguma noção de probabilidade para as variáveis utilizadas pelo agente na sua função.

Capacidade de Comunicação - A capacidade de comunicação do agente implica apenas que ele pode mandar ou receber mensagens para/de outros agentes. Estas mensagens têm um protocolo simplificado mas não implementam nenhum subconjunto de qualquer linguagem de comunicação de agentes. A implementação de uma estrutura completa de comunicação baseada em uma linguagem de comunicação de agentes está fora do escopo deste trabalho. Uma boa abordagem sobre este tipo de implementação é o trabalho de Richard Vieira (VIEIRA, 2000).

Um agente adaptativo com racionalidade limitada foi então implementado num programa computacional para a simulação de situações definidas por Axelrod (AXEL-

ROD, 1997b, pp. 41-48) como dilema do prisioneiro para *n-pessoas*. O caso da tragédia dos comuns é visto pelo autor como um problema deste tipo. Nestas situações, os modelos de simulação e os estudos empíricos demonstraram que não há soluções simples para este tipo de problema. Quando há mais que uma quantidade pequena de agentes envolvidos o problema regras simples de reciprocidade parecem não funcionar (AXELROD, 1997b, p. 41). O que parece ser um aspecto importante para produção de situações de equilíbrio nos problemas de ação coletiva é alguma forma de superar a racionalidade individual (e, portanto, a ação de *aproveitadores*¹⁰) a partir da produção de normas que estabeleçam o controle e a punição dos indivíduos que tenham este tipo de comportamento. Ao que parece, porém, a solução para um processo virtuoso de produção de normas de reciprocidade para uma ação coletiva que preserve os recursos comuns (de uso ou propriedade comum) ainda não existe. Vai-se agora analisar as relações entre racionalidade individual e este tipo de problema de ação coletiva buscando verificar como a abordagem de modelagem proposta neste trabalho pode ser um instrumento útil para tratar este tipo de problema.

1.4 Recursos Comuns, Ação Coletiva e Sistemas Multiagentes

1.4.1 Recursos Comuns e a Tragédia dos Comuns

A discussão sobre crise do uso de recursos comuns inicia-se com o trabalho de Hardin (HARDIN, 1968). O anúncio de Hardin era que os recursos usados em comum

¹⁰free-riders

ou de propriedade comum tendiam a se esgotar. Este modelo anunciava, obviamente, uma crise ambiental que aconteceria um dia com recursos mundiais como o mar ou a atmosfera. O ponto de partida de Hardin é a diferença entre a racionalidade dos indivíduos e a “racionalidade coletiva” (FEENY; et. al., 1990). Esta diferença entre benefícios/prejuízos individuais de curto prazo benefícios/prejuízos coletivos de curto ou longo prazos é uma questão que está na base das teorias de ação coletiva. A suposição subjacente a esta perspectiva é que os indivíduos tentam maximizar o retorno de suas ações (a sua utilidade). O problema é que o *horizonte de previsão* (LANE; MAXFIELD, 1997) dos agentes é de curto prazo, e as conseqüências das suas ações ocorrem no longo prazo. Isso implica que as soluções que incorporem as conseqüências de longo prazo na decisão dos agentes serão, provavelmente, consideradas “irracionais” ou deverão ser preteridas por retornos maiores no curto prazo.

A idéia de recursos comuns está associada a formas de propriedade destes recursos que não impõem restrições ao seu acesso ou uso. Formas de propriedade, porém, são construções sociais. Cada sociedade produz estas formas de acordo com o seu processo de evolução histórica. A crise ambiental produzida pela escassez de recursos é deduzida por Hardin de um modelo de racionalidade onde não se presume nenhuma restrição ou controle social às ações dos indivíduos. A solução apontando para a privatização ou propriedade estatal dos recursos comuns é uma conseqüência necessária do modelo de racionalidade individual usado por Hardin. Só a definição de uma relação qualquer de propriedade destes recursos pode permitir, dentro do conceito desta racionalidade otimizadora, a preservação deles no longo prazo.

Neste sentido, soluções que impliquem em uma “privatização dos recursos comuns” de forma a estabelecer padrões menos insustentáveis de uso são filhas das soluções propostas a partir da discussão do dilema dos comuns. No caso dos recursos florestais, a instalação de FLONAS¹¹ (a submissão de grandes áreas de recursos florestais para a exploração privada através de concessões estatais) é um exemplo deste tipo de solução. A suposição subjacente a esta solução é que o controle de grandes concessões submetidas a grandes empresas pode ser mais efetivo que um controle de um grande número de áreas pulverizadas numa miríade de planos de manejo. Um problema na implementação deste tipo de solução é que não se pode supor que os detentores do recurso (mesmo sendo uma concessão) vão agir em busca de objetivos que atendam ao interesse coletivo (ou seja, o uso sustentável dos recursos no longo prazo). A suposição mais coerente é que os agentes vão buscar as soluções que impliquem nos maiores ganhos possíveis de acordo com os objetivos que eles querem otimizar. Assim, a imposição de concessões (como as FLONAS) está necessariamente ligada a um processo que implique em ganhos para os agentes que participarem da negociação. Neste sentido o espaço de soluções possíveis deve necessariamente levar em conta que uma política de concessões só poderá ser bem sucedida se também considerar a alternativa que têm os agentes de utilizar os recursos privados disponíveis. Além disso, será necessário ampliar o controle sobre o acesso a áreas públicas (reservas indígenas, por exemplo) onde existe matéria-prima disponível. Se estas restrições e controles não forem efetivos, os agentes continuarão considerando a extração ilegal de recursos florestais uma alternativa viável.

¹¹Florestas Nacionais

Outro tipo de solução também filha da discussão sobre o dilema dos comuns é o estabelecimento de grandes áreas de reservas sob a tutela do Estado (seja ele governo federal, estados ou municípios). Neste tipo de solução se presume que o Estado seja o guardião do interesse coletivo, assumindo assim o controle sobre o uso e a preservação do interesse e dos recursos comuns. Um requisito para que o estabelecimento de reservas seja uma solução viável é a existência de controle efetivo do Estado sobre as áreas. Sem este controle a exploração ilegal destes recursos passa a ser uma alternativa extremamente atraente para os agentes. Além do mais, em áreas como reservas indígenas ou extrativistas, por exemplo, os próprios agentes (índios e caboclos) que supostamente deveriam utilizar de maneira “sustentável” os recursos disponíveis podem também passar a ver a sua exploração econômica com práticas predatórias uma alternativa viável, principalmente se esta alternativa é comparada com práticas extrativistas que produzem uma renda muito inferior.

Supor uma “racionalidade coletiva” que esteja além das interações dos agentes é uma saída idealista que não ajuda na produção de soluções concretas para os problemas de uso dos recursos comuns ou de propriedade comum. A *racionalidade individual*, mesmo que considerada na sua versão fraca não tem nenhuma necessidade de ser coerente com uma eventual racionalidade coletiva que produza o “bem comum”. É mais coerente supor que os indivíduos agem a partir de algum comportamento otimizador (mesmo que com uma *racionalidade fraca*) onde os objetivos comuns de longo prazo têm pouco ou nenhum peso.

Uma questão a considerar é qual o papel que tem interações entre os os agentes

sobre a sua racionalidade? É possível identificar problemas de ação coletiva onde restrições sociais, situações de reforço provocadas pelas respostas do grupo social a determinada crise produziram ações individuais não condicionadas pela racionalidade otimizadora?

1.4.2 Racionalidade e Ação Coletiva

Diferentes suposições sobre a racionalidade surgiram para discutir esta questão. Mesmo supondo que a racionalidade dos agentes não tem limites na capacidade de tratamento da informação relevante para a tomada de decisão, não há garantias de que o agente tenha informação completa para uma decisão ótima. A suposição de racionalidade com informação incompleta já permite a existência de inconsistências entre a tomada de decisão individual e a solução ótima para o grupo como um todo. O dilema do prisioneiro ¹² é um exemplo clássico deste tipo de problema. Se for suposto, então, que os agentes não têm conhecimento sobre quanto é o uso total dos recursos comuns ou sobre quais as consequências de sua exploração, a trajetória que se pode antecipar é uma crise ambiental.

Mesmo sendo condição suficiente supor uma dificuldade de acesso à informação completa para a ocorrência de crises ambientais, é necessário observar o comportamento real dos agentes para verificar se as suposições sobre racionalidade são consistentes em dilemas sociais. Observações sobre comportamento individual como as feitas por Tversky e Kahneman (TVERSKY; KAHNEMAN, 1974) demonstraram que o comportamento dos agentes em jogos repetidos não é consistente com as su-

¹²Do qual o dilema dos comuns é um caso especial

posições de racionalidade forte. Isto põe o fato de que a racionalidade dos agentes é condicionada por outros fatores que não apenas a sua consistência intrínseca. Estes condicionantes nos permitem supor a necessidade de uma “teoria comportamental da escolha racional” (OSTROM, 1998).

As limitações na racionalidade podem ser atribuídas, ao menos, à incapacidade dos indivíduos de processar em tempo suficiente toda a informação relevante para uma tomada de decisão ótima (SIMON, 1981). Em dilemas sociais, ou seja, situações onde indivíduos fazem escolhas independentes quando suas decisões influenciam coletivamente o grupo, a discussão sobre ação racional toma um peso maior. Prever o comportamento dos agentes em condições de incerteza associadas a problemas de ação coletiva é uma possibilidade que pode surgir de uma ampliação das suposições sobre a racionalidade dos agentes. Esta ampliação pode começar com a suposição de uma racionalidade fraca, porém, é preciso identificar como condicionantes sociais, costumes, antecipação de benefícios ou perdas futuras, influenciam a possibilidade dos indivíduos agirem coletivamente de forma coordenada (cooperarem).

Este tipo de ampliação das suposições sobre a racionalidade individual dá um peso maior aos condicionantes sociais no processo de escolha. Os elementos que determinariam o comportamento individual seriam não somente a expectativa de maximização de benefícios pessoais, mas também elementos associados a heurísticas, regras e normas que seriam, ao menos parcialmente compartilhados pelos membros do grupo. A razão da existência de heurísticas e normas é a racionalidade limitada. A incapacidade de prever todas as conseqüências das ações, e as evidências de que os

agentes quase sempre não conseguem encontrar estratégias ótimas mesmo em jogos repetidos levam à conclusão que a percepção, a capacidade “computacional” e os esquemas de resolução de sentenças lógicas dos agentes são parciais ou inconsistentes com os esquemas formais utilizados teoricamente. Torna-se necessário, então, avaliar que modelos de racionalidade podem ser consistentes com as evidências empíricas.

Modelos de racionalidade limitada que considerem elementos como heurísticas e normas de reciprocidade podem avançar no sentido de estruturar cenários mais consistentes com as evidências empíricas. A incorporação de componentes determinados socialmente como heurísticas e normas permite uma mudança de escala na discussão sobre ação coletiva e recursos comuns, o eixo passa da inconsistência entre racionalidade individual e racionalidade coletiva para a discussão sobre os condicionantes sociais (ou socialmente determinados) da ação dos indivíduos. Há espaço então tanto para discutir as inconsistências entre ações de indivíduo e grupo, quanto para discutir cenários onde elementos de cooperação e outros tipos de ação coordenada podem emergir (OSTROM, 1998, p.14).

Supor a racionalidade como, ao menos parcialmente, socialmente determinada, não afasta a possibilidade de crise no uso de recursos comuns ou mesmo de crises ambientais provocadas pela ação dos indivíduos de um determinado grupo. A idéia de uma racionalidade socialmente determinada reforça a afirmação de que crises ambientais são crises sociais. A própria noção de crise é socialmente determinada. Este condicionamento social da racionalidade dos indivíduos, porém, abre espaço para a elaboração de modelos de ação coletiva onde possam entrar combinação de

elementos de cooperação e coerção socialmente determinados. As soluções para as crises ambientais podem então estar na construção de modelos de atuação que incentivem a cooperação dos indivíduos e o controle social da ação de governo e grandes empresas e na criação de novas regras e normas para o uso de recursos comuns.

Desta interação entre os condicionamentos sociais da ação dos indivíduos, e a racionalidade (de cada indivíduo) que podem surgir *insights* adequados para modelos mais realísticos da dinâmica da ação coletiva. Modelar os processos de tomada de decisão implica em modelar as interações entre *racionalidade (fraca)* e *contexto social*. É preciso, porém, estabelecer mais claramente como estas interações ocorrem e como, a partir do contexto construído por estas interações, os indivíduos reconstróem os elementos que baseiam suas decisões.

1.4.3 Ambiente e Racionalidade dos Agentes

O foco da modelagem da tomada de decisões dos agentes neste trabalho é a interação entre racionalidade e ambiente. Por ambiente se denota o contexto social onde decisões sobre produção e investimento dos agentes são tomadas. O ambiente é fonte de informação e, também, em última análise, resultado do processo de tomada de decisão dos agentes. A suposição de que o comportamento dos agentes é dirigido por alguma racionalidade é um antecedente necessário para a construção do modelo aqui proposto. Definiu-se acima a noção de racionalidade que se utiliza aqui (racionalidade fraca). Para o tema que interessa neste trabalho (dinâmica das decisões de produção e investimento na indústria madeireira), assumir-se-há algu-

mas suposições sobre esta racionalidade no processo de tomada de decisão e sobre o ambiente que condiciona este processo. Estas suposições não são apriorísticas e estão condicionadas por observações de campo e na literatura pertinente ao assunto. Mas, é preciso dizer que a questão dos modelos de racionalidade e da tomada de decisão em contextos econômicos (e, mais profundamente, dos condicionantes estruturais dos processos de aprendizado dos indivíduos) é um problema ainda aberto em teoria econômica e mesmo na teoria cognitiva.

1.4.4 Arcabouço Institucional e Comportamento Estratégico

Pode-se dizer que o processo de tomada de decisão de um agente está condicionado por dois aspectos que interagem mas não podem ser vistos um em função do outro: a racionalidade do agente e o ambiente.

O agente está imerso no ambiente. Este ambiente estabelece as condições de subsidiárias i.e. os limites onde as decisões dos agentes podem ser consideradas racionais. Estas condições de subsidiárias são estabelecidas por dois aspectos fundamentais. O primeiro deles é o conjunto de normas e regras que determinam o que é possível ou não no contexto onde os agentes estão inseridos (o *Arcabouço Institucional*). O segundo aspecto é o comportamento de outros agentes cujas decisões são relevantes para o negócio do agente. Pode-se chamar este processo de interação entre os agentes de *comportamento estratégico*. Este comportamento estratégico, determinado pelos processos de interação dos agentes, é o principal elemento dos seus processos de decisão quando modelados pela teoria dos jogos.

O arcabouço institucional determina as restrições para os agentes entrarem ou saírem de determinado negócio. Determina também os custos para a atuação dos agentes. Este arcabouço pode também determinar o volume mínimo de capital necessário para tornar o negócio do agente rentável. Na literatura econômica estes condicionantes são eventualmente conhecidos como tipos de *barreiras à entrada*. Um exemplo de parte do arcabouço institucional que pode estabelecer limites para a atuação dos agentes no negócio de madeira é uma legislação que condicione o acesso ao recurso florestal a concessões estatais. Esta restrição ao acesso à matéria-prima da indústria pode determinar, em última análise, quais serão os agentes que poderão se manter no negócio, quais aqueles que não terão condições de manter uma exploração dentro da legalidade. Outro componente que condiciona a atuação dos agentes é a exigência (e o cumprimento desta exigência) da produção de *planos de manejo* para a exploração madeireira. O cumprimento desta exigência estabelece limites máximos de exploração para as áreas à disposição dos madeireiros (em m^3ha^{-1}). Estes limites de intensidade de exploração vão estabelecer os níveis de rentabilidade do negócio onde os madeireiros podem atuar. O cumprimento ou não das exigências estabelecidas pelo arcabouço institucional vai ser determinado pelo comportamento dos agentes envolvidos no negócio (madeireiros, proprietários de terra, governos federal, estadual e municipal).

Os madeireiros parecem ter pouca influência na determinação dos preços de insumos industrializados de sua produção, e é provável que tenham também pouca influência na determinação do preço dos produtos de suas empresas. Estes madeirei-

ros, porém, têm forte influência na determinação dos preços de compra da madeira em tora nas áreas de exploração. Como os preços de demanda estão fortemente restringidos pela estrutura dos mercados consumidores, a principal forma de aumentar a margem de rentabilidade da madeira em tora é reduzindo ou custos de coleta e/ou os preços de compra da madeira em tora.

Também é plausível supor que o madeireiro não tem como conhecer todos os elementos que influenciam as variáveis do ambiente em que ele está inserido. Esta incompletude do conhecimento do ambiente, é uma das fontes de incerteza com as quais o agente (o madeireiro, neste caso) tem que lidar. Esta incerteza, é mais forte pelo fato de que o processo de exploração acontece, muitas vezes, em condições de ilegalidade, sem o cumprimento de planos de manejo ou dos requisitos legais para a exploração de madeira de derrubadas, com a falsificação de ATPF's¹³, por exemplo. As condições de ilegalidade e as mudanças nas regras do negócio (as sucessivas mudanças na legislação sobre a exploração e as mudanças na política de fiscalização, por exemplo) ampliam fortemente a incerteza nos horizontes de previsão de prazo mais longo. Isto faz com que o estabelecimento de padrões de exploração que proporcionem uma rentabilidade alta de curto prazo sejam preferíveis a padrões mais sustentáveis de exploração com horizontes de longo prazo. Esta incerteza é aumentada pelo fato de que as mudanças provocadas na floresta pela própria exploração predatória da madeira aumente ainda mais as exigências de rentabilidade de curto prazo.

¹³Autorizações de Transporte de Produtos Florestais

1.4.5 Transformação do Ambiente, Complexidade e Comportamento Estratégico

Este *ambiente em transformação* aumenta ainda mais a incerteza e a complexidade da atividade madeireira. O ambiente é significativamente alterado por decisões tomadas pelos agentes (empresas, madeireiros, governo, etc). Estas decisões sobre investimento, por exemplo, foram chamadas por (SHACKLE, 1955b), (SHACKLE, 1955a) de cruciais. Esta transformação constante produz outra fonte de incerteza, o agente (neste caso, o madeireiro) não pode antever com segurança as trajetórias das variáveis relevantes para a sua produção, portanto, decisões satisfatórias tomadas em um determinado contexto, podem ser um erro em momentos futuros. Complexidade (muitos agentes, muitas interações) e Incerteza (incompletude da informação, transformação do ambiente) são os elementos que condicionam as decisões de um agente. Para se construir um modelo para o comportamento dos agentes é preciso levar estas condições do ambiente em conta.

Os agentes (os madeireiros entre eles) não deixam de decidir em face da complexidade ou incerteza. A trajetória para construção de modelos para a racionalidade dos agentes pode partir, então, dos elementos empíricos que estão postos para problemas específicos e, depois poder-se-ia pensar em alguma generalização. Neste sentido, a pergunta sobre as diferenças específicas entre racionalidade dos madeireiros e racionalidade em geral não poderá ser respondida sem um ponto de partida num estudo sobre o comportamento dos agentes. Este ponto de partida, porém, necessita de um modelo que possa suportá-lo incorporando os elementos empíricos

em uma fôrma genérica o suficiente para que se possa operá-la.

Um modelo deste porte, porém encontra novamente o problema de sua operacionalização. A generalização deste modelo, de sua abordagem microeconômica para uma escala mais ampla (para Amazônia, por exemplo) implica em manter a consistência formal no processo. Uma forma de operacionalizar estes estudos pode ser o uso de modelos de simulação. Esta simulação, porém, não pode ser uma abordagem macro, de um conjunto de equações que expressem dinâmicas agregadas. Esta abordagem agregada não viabiliza o teste das suposições sobre o comportamento dos agentes. O modelo de simulação que pode ser efetivo deve ser construído a partir das suposições sobre o comportamento dos agentes e com as variáveis específicas para a modelagem deste comportamento. Estas suposições precisam ser incorporadas em um modelo de simulação que tenha a noção de agente como elemento construtivo básico. Esta visão está na base do que é tradicionalmente conhecido como modelos de simulação baseada em agentes.

Um modelo de simulação multiagentes, então, será utilizado para, a partir das suposições sobre racionalidade e o comportamento dos agentes, construir um modelo agregativo para estas suposições. A validação do modelo será feita pela confrontação dos resultados das simulações com os dados disponíveis e com as dinâmicas observadas no modelo, comparando-as com a dinâmica observada da própria atividade.

O uso sistemas multiagentes para simulação é o foco deste trabalho. A abordagem desenvolvida aqui incorpora algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975)¹⁴ a

¹⁴Algoritmos Genéticos é uma técnica desenvolvida no campo da inteligência artificial adequada para a otimização de funções multidimensionais dirigida por uma função de *fitness* e um processo

ambientes e modelos de simulação multiagentes. A idéia central que motiva esta abordagem é que modelos computacionais baseados em *agentes adaptativos artificiais* são uma técnica que permite um melhor *mapeamento* do papel dos agentes observados. Este mapeamento pode permitir um tratamento melhor das complexidades envolvidas em sistemas sócio-econômicos, ampliando assim o alcance e as possibilidades da modelagem sócio-econômica.

2 Modelagem e Simulação Multiagentes

Neste capítulo se discute o uso da simulação e modelagem computacional como uma abordagem possível para processos econômicos e alguns arcabouços de simulação multiagentes. Apresenta-se, também, a implementação da ferramenta de modelagem desenvolvida para este trabalho e o modelo de agente adaptativo artificial implementado na ferramenta de simulação.

Inicialmente é discutido o uso da abordagem de simulação discreta como ferramenta de modelagem em economia, suas vantagens e desvantagens e as possibilidades abertas por esta abordagem *vis-a-vis* os dados existentes para o problema de pesquisa apresentado na tese. Após isto, são discutidos, também, os principais arcabouços de simulação multiagentes e as implementações de modelos que utilizam a simulação multiagentes em problemas de recursos de uso comum. Finalmente se apresenta o arcabouço de simulação desenvolvido para este trabalho e a implementação computacional do modelo de agente adaptativo com racionalidade limitada implementado para a simulação.

2.1 Simulação Computacional de Processos Econômicos

Nos últimos anos tem se tornado cada vez maior o número de trabalhos usando a simulação de modelos econômicos como instrumento de análise. O uso de “experimentos computacionais” como ferramenta de análise econométrica foi discutido por Kydland e Prescott (KYDLAND; PRESCOTT, 1996). Neste trabalho aparece como o elemento principal a formulação de questões quantitativas que permitam o desenvolvimento de modelos computacionais dentro do contexto da teoria econométrica. O centro da formulação dos modelos resenhados está na busca da representação de condições do equilíbrio. O substrato teórico são os modelos neoclássicos de equilíbrio geral e de crescimento. O trabalho de Kydland e Prescott pode ser considerado representativo de determinada abordagem da simulação em economia, a computação de condições de otimização. Neste sentido, o uso de algoritmos de otimização numérica ou de algoritmos adaptativos (como algoritmos genéticos, por exemplo) entra como um elemento para a busca destas condições de equilíbrio (ARIFOVIC, 1996).

Nos trabalhos citados em Kydland e Prescott (KYDLAND; PRESCOTT, 1996), não se tem a explicitação da noção de “agente”, ou, quando ela é utilizada vem carregada da estilização e das restrições necessárias para a formulação de modelos consistentes com as formulações teóricas neoclássicas. Estas restrições (ou requerimentos, nas palavras de Sargent (SARGENT, 1993) são duas:

1. Racionalidade individual: que pressupõe uma função qualquer de preferências (função de utilidade) e a “intenção” do agente em otimizar estas preferências;

2. Consistência mútua das percepções dos agentes sobre o ambiente, o que pressupõe um conhecimento dos agentes sobre as distribuições de probabilidade de equilíbrio no sistema econômico que (o próprio Sargent admite) estão muito acima do conhecimento que os agentes podem possuir.

Estes requisitos são necessários para a redução de modelos com informação incompleta para modelos com informação imperfeita que podem ser resolvidos com a suposição que os agentes utilizam probabilidades bayesianas (HARSANYI, 1967). A sugestão de Sargent (SARGENT, 1993) é relaxar a suposição da mútua consistência das expectativas, substituindo estes agentes estilizados por (um pouco menos estilizados) “agentes artificialmente inteligentes”, comportando-se como “econometristas” que, “teorizando, estimando e adaptando-se” tentariam aprender sobre as distribuições de probabilidade que em condições de “expectativas racionais, eles realmente conheçam”. Esta perspectiva leva, segundo Hyman Minsky (MINSKY, 1996) os teóricos das expectativas racionais rumo à visão keynesiana estabelecida no *Treatise on Probability* (KEYNES, 1973). Um aspecto fundamental da proposta de Sargent (um economista do mainstream) é apontar para o estabelecimento de uma ponte que, ligaria três campos inter-relacionados: estatística, economia e inteligência artificial.

Esta ponte, porém, não é tão nova quanto parece. A inteligência artificial tem incorporado uma série de conceitos que eram de uso comum na economia. Esta “contaminação” se dá porque parte do objeto de estudo da economia também é compartilhado pela inteligência artificial, a *racionalidade humana* e a interação en-

tre agentes com algum grau de inteligência. Entre estes conceitos são destacados: A noção de Função Utilidade, a Racionalidade Limitada e a idéia da distribuição eficiente a partir de Mecanismos de Mercado. Destas três idéias discutiu-se, no capítulo anterior a *racionalidade limitada* e a *função utilidade* que são os elementos básicos para o modelo do agente utilizado neste trabalho.

A Economia, por seu turno, também incorporou alguns desenvolvimentos do campo da inteligência artificial. Alguns deles são: O uso de *Redes Neurais Artificiais* na previsão de séries temporais (CURRY, 2004; CHEN; LEUNG, 2004), o uso de *Algoritmos Genéticos* em problemas associados a otimização de parâmetros (PERIAUX, 2001) e simulação de séries temporais (ARIFOVIC, 1996), o uso de *Sistemas Classificadores e Algoritmos Genéticos* na simulação do comportamentos dos agentes (SARGENT, 1993; MILLER, 1996; CROWLEY, 1996), muitos destes trabalhos integram algoritmos genéticos e teoria dos jogos, e, finalmente, o uso de Programação Genética também para a simulação de comportamentos dos agentes (EDMONDS, 1999b).

Estas técnicas fazem parte de um novo campo de estudos em modelagem e simulação computacional em economia chamado de *Economia Computacional* dentro deste campo se situa a discussão sobre *Economia Computacional Baseada em Agentes* (TESFATSION, 2003)

2.1.1 Economia Computacional e Simulação Baseada em Agentes

Testfatsion (TESFATSION, 2003) define uma economia de mercado como um sistema complexo da seguinte forma:

Decentralized market economies are complex adaptive systems, consisting of large numbers of adaptive agents involved in parallel local interactions. These local interactions give rise to macroeconomic regularities such as shared market protocols and behavioral norms which in turn feed back into the determination of local interactions. The result is a complicated dynamic system of recurrent causal chains connecting individual behaviors, interaction networks, and social welfare outcomes ¹.

A visão da economia como um sistema adaptativo complexo é algo que tem como fonte a discussão sobre complexidade gerada a partir da década de oitenta em grupos como o *Santa Fe Institute* de Santa Fé, Novo México (EUA). Esta percepção das mútuas determinações entre comportamentos individuais e dinâmicas econômicas agregadas, enxerga a economia como *uma totalidade complexa evolutiva* que surge do comportamento dos agentes e, ao mesmo tempo, produz um *ambiente* de normas, heurísticas, protocolos que condiciona o comportamento dos próprios agentes (EPSTEIN; AXTELL, 1996; ARTHUR; DAVID A LANE, 1996). Holland vai chamar

¹Economias de mercado descentralizadas são sistemas adaptativos complexos, que consistem de um grande número de agentes adaptativos envolvidos em interações locais paralelas. Estas interações locais geram as regularidades macroeconômicas tais como protocolos de mercado compartilhados e normas comportamentais que, de volta, realimentam a determinação das interações locais. O resultado é um sistema dinâmico complicado de cadeias causais conectando comportamentos individuais, redes de interação e resultados de bem estar social

estes sistemas de (HOLLAND, 1988) de *redes não-lineares adaptativas*. Estes sistemas têm como característica essencial o fato de anteciparem a dinâmica do sistema onde estão imersos. Esta abordagem impõe complexidades de tratamento formal que vão além das ferramentas costumeiramente usadas pelos cientistas. Estes processos não-lineares, que estão na fonte da dinâmica fora do equilíbrio da economia, tornam a análise da economia, pensada na perspectiva destas *redes*, algo difícil de ser executado com as ferramentas matemáticas tradicionais que levam em conta, na maioria das vezes, soluções que consideram linearidade, pontos fixos e sistemas de equações diferenciais (ARTHUR; DAVID A LANE, 1996, p.4). As características que tornam estes processos de difícil modelagem com as técnicas citadas acima são:

1. a interação dispersa em paralelo entre muitos agentes heterogêneos. A ação de um agente depende da antecipação da ação de um número limitado de outros agentes e da dinâmica agregada do sistema que é produzida pelos agentes;
2. não há um controlador global para as interações entre os agentes. Os mecanismos de competição e coordenação controlam estas interações. Regras, convenções e instituições mediam a interação;
3. há muitos níveis de organização e interação entre os agentes, podendo as unidades de um nível servirem como blocos de construção de unidades de outro nível, mas sem a limitação de algum tipo de interação entre os níveis;
4. os agentes mantêm-se em um processo de adaptação contínua revisando seus comportamentos e ações constantemente à medida que adquirem informação

sobre o sistema;

5. os agentes criam constantemente novos nichos de atuação, mantendo o sistema em um estado de novidade perpétua (*perpetual novelty*); (ARTHUR; DAVID A LANE, 1996, pp.3-4).

Esta novidade perpétua mantém o sistema em uma dinâmica fora do equilíbrio, o que leva o funcionamento dos sistemas para longe de qualquer equilíbrio global ou nível ótimo.

A dificuldade para avançar neste programa de pesquisa é enorme, e, ainda é necessário um grande esforço para a construção da teoria e das ferramentas de estudo para que esta abordagem possa produzir resultados mais significativos. Um componente que tem importância crucial para o estudo deste tipo de sistema é a simulação computacional. A ênfase destas técnicas de simulação computacional vai estar muito mais na descoberta das estruturas que produzem a dinâmica e nos processos através dos quais as estruturas emergem do que no cálculo de situações de equilíbrio estável ou de soluções ótimas para problemas de alocação de recursos. A questão passa a ser, então, como ampliar as possibilidades semânticas das ferramentas para representar estes modelos?

2.1.2 Simulação Computacional Multiagentes

Um dos caminhos tentados para a ampliação das capacidades semânticas dos modelos formais é a idéia de modelar os sistemas complexos a partir de alguma *unidade descritiva* que possua mecanismos adaptativos e permita modelar a interação

com outras unidades descritivas de diversos níveis. As ferramentas matemáticas para este tipo de abordagem ainda são uma questão em aberto. Uma alternativa para a modelagem deste tipo de sistema é a simulação computacional multiagentes. A abordagem de simulação discutida neste trabalho começou a ser trazida como um problema interessante dentro da teoria econômica com o trabalho de W. B Arthur (ARTHUR, 1991, 1994). O uso de simulação multiagentes disseminou-se nos estudos de complexidade principalmente com o trabalho de grupos de pesquisa associados ao Santa Fe Institute (SFI).

A primeira ferramenta de simulação multiagentes a ter um uso generalizado foi o *Swarm*² (MINAR, 1996; BUCKHART, 1997) que implementa algumas das idéias sobre o uso simulação discreta multiagentes para o tratamento de problemas complexos. Trata-se especificamente do Swarm mais a frente neste capítulo. Outro grupo que também tem trabalhado em Simulação sócio-econômica e desenvolvido ferramentas para uma abordagem multiagentes para o tratamento de problemas complexos é o *Centre for Policy Modelling* (CPM)³ da Universidade Metropolitana de Manchester. Este grupo também desenvolveu uma ferramenta de simulação baseada em uma linguagem declarativa⁴. O trabalho do CPM tem se voltado mas

²<http://www.swarm.org>

³<http://www.cpm.mmu.ac.uk>

⁴As linguagens declarativas podem ser vistas como implementações computacionais da lógica de predicados. Numa linguagem tradicional (*imperativa*) o programador deve necessariamente especificar lógica do programa (o que o programa vai fazer) e o controle para que a meta possa ser alcançada (como, a partir de um conjunto sequencial de instruções o programa vai chegar à meta). Numa linguagem *declarativa* o foco da programação se volta na produção de sentenças que são verdadeiras (o que) e o interpretador/compilador se encarregará de, a partir dos dados garantir a verificação dos valores verdade das sentenças. O programador então não precisa se concentrar no *como fazer*. Linguagens declarativas como PROLOG e LISP são muito usadas em algoritmos e inteligência artificial.

especificamente para a simulação econômica (EDMONDS, 1999b, 1999a). Embora a idéia de uma ferramenta de simulação baseada em uma linguagem declarativa seja bastante interessante, no sentido que, em uma linguagem declarativa, a consistência formal dos modelos implementados tende a ser maior, o seu uso não se generalizou. Talvez pela dificuldade da implementação de modelos declarativos mais complexos. Uma terceira ferramenta de simulação que será analisada neste capítulo é o *RePast*⁵. RePast é uma ferramenta de simulação multiagentes baseada no Swarm. Funciona em Java e implementa as principais características de simulação multiagentes existentes no Swarm. Finalmente, analisar-se-á o *CORMAS*⁶ que é uma ferramenta de simulação multiagentes implementada pelo CIRAD (*Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*) da França. Esta ferramenta utiliza SmallTalk como linguagem de implementação.

Alguns estudos já demonstram os resultados e as possibilidades destas abordagens para o tratamento de problemas de diversos matizes. Axelrod (AXELROD, 1997b), discute problemas de coordenação e cooperação a partir de elementos da teoria dos jogos. Lim et al. (LIM, 2000) modelam, a partir de dados de satélite, a ocupação de uma área do estado do Pará (Altamira), utilizando o Swarm e um sistema classificador. Kohler e Carr (KOHLE; CARR, 1997), produziram estudos sobre o processo de desenvolvimento do uso da terra pelos índios Anasazi utilizando um modelo que integrava dados do solo (tipos de solo, cursos d'água, relevo, etc.) e um modelo de simulação baseado em sistemas multiagentes (usando o Swarm). O

⁵<http://repast.sourceforge.net>

⁶<http://cormas.cirad.fr/indexeng.html>

uso de simulação computacional para o tratamento dos complexos problemas sócio-econômicos tem se mostrado um caminho possível. Resta, porém, avaliar se este caminho mantém as possibilidades abertas por estes estudos.

Uma discussão sobre simulação baseada em agentes, uma análise dos arcabouços de simulação multiagentes citados acima e uma descrição do arcabouço de simulação multiagentes bem como do agente implementado para este trabalho serão feitas agora.

2.2 Modelos Baseados em Agentes

A noção fundamental utilizada na construção do ambiente de simulação é a de Agente Adaptativo Artificial (AAA). Há uma crescente literatura sobre o uso de AAAs em simulação computacional. As vantagens de produzir mapeamentos mais precisos entre sistemas complexos observados e os agentes já foram citadas aqui. Outro elemento importante é que é possível obter resultados interessantes, como estratégias parcialmente estáveis, por exemplo (AXELROD, 1984, 1997b), utilizando AAA em simulações construídas a partir de conceitos de teoria dos jogos. A simulação do Dilema do Prisioneiro Iterado é um ponto de partida importante neste sentido. Deadman e Schlager (DEADMAN, 1999; DEADMAN; SCHLAGER, 2000) utilizam simulação multiagentes para implementar modelos que discutem o uso de recursos comuns. Os agentes adaptativos são chamados pelo autor de agentes com *racionalidade restrita*⁷. Estes agentes têm como função a otimizar os retornos

⁷Utilizou-se aqui *racionalidade restrita* como tradução de *limited rationality* uma vez que o termo *racionalidade limitada* consagrou-se como a tradução de *bounded rationality*.

econômicos do uso dos recursos comuns. Cada agente utiliza *mecanismos indutivos* (ARTHUR, 1994) para descobrir as melhores estratégias, dada a sua função de otimização. Cada agente tem um conjunto de 16 estratégias que ele tenta otimizar. O mecanismo de aprendizado utilizado é um *algoritmo genético*. Uma das observações interessantes deste modelo é que nenhuma estratégia dominante emerge com escolha de todos os agentes. Isto, para o autor, se deve ao fato que estratégias que têm boa performance para um agente em um determinado ponto do tempo, têm performances ruins para outros agentes em outro ponto da simulação. A renda global dos agentes, em relação à função de produção ótima estabelecida no modelo varia de forma complexa. Isto significa que é extremamente difícil prever, a partir de um conjunto determinado de condições iniciais, qual vai ser o desempenho de um determinado agente e do próprio modelo global. Para o autor, as recomendações relevantes para esta abordagem de modelagem sobre problemas de recursos comuns são as seguintes:

- os modelos devem considerar diversos mecanismos de aprendizado e funções de previsão (formação de expectativas) para testar quais são potencialmente mais coerentes com as observações;
- modelos que considerem a comunicação de agentes e explicitem o desenvolvimento de regras devem ser tentados;
- aspectos específicos do problema dos recursos comuns como a probabilidade de sua destruição e sanções sobre o uso indevido destes recursos devem também ser experimentados.

A implementação de um agente adequado para o tratamento de problemas como o do uso de recursos comuns, neste tipo de abordagem, deve levar em conta os processos de aprendizado que considerem alguma formação de expectativas. Isto é, os agentes não podem considerar só a otimização de funções locais, mas devem ter como componente de seu modelo uma *função de expectativas*. Este problema, já tinha sido colocado, de maneira mais clara pelos teóricos de jogos. Esta *função de utilidade esperada* é um componente fundamental do processo de decisão do agente. Esta função, combinada com o resultado de todos os movimentos possíveis num jogo é o que leva às soluções típicas encontradas nos modelos clássicos de jogos (como o dilema do prisioneiro). O problema, como se viu anteriormente, é que os agentes não têm condições de estabelecer uma estratégia ótima, sendo assim crucial algum mecanismo adaptativo. Nesse, sentido, funções de previsão mais acuradas (para a formação das expectativas) não necessariamente possibilitam uma maior consistência na determinação do comportamento dos agentes. Assim, funções de previsão simples podem ser tentadas como um ponto de partida para os modelos. Se considerar-se os agentes com racionalidade limitada, é plausível supor que os horizontes de previsão dos agentes são curtos e as expectativas estarão muito mais condicionadas pelas *condições subsidiárias* (que formam o *ambiente* do agente) e pelos aspectos de curto prazo, do que por antecipações mais completas e que avancem para um horizonte de tempo maior.

Se o foco está no ambiente, então, modelos para a formação de normas e para a percepção dos agentes sobre punições e sanções para os *free-riders* são o componente

mais crítico do processo de modelagem. Estes mecanismos de comunicação e a sensibilidade dos agentes à possibilidade de sanções (que pode ser modelado como aversão ao risco) podem permitir a investigação dos processos de comunicação envolvidos no surgimento de normas de reciprocidade no controle dos recursos comuns (THÉBAUD; LOCATELLI, 2001; DORAN, 2001; DEADMAN; SCHLAGER; GILBERT, 2001) bem como o papel da reputação dos agentes na construção de regras de reciprocidade no uso de recursos comuns (CROWLEY, 1996).

A discussão sobre a construção de normas parece então ser o aspecto mais visível na área de modelagem multiagentes do uso de recursos comuns. Pouco tem sido discutido, no entanto, do papel dos custos das punições e sanções sobre o uso indevido destes recursos. Ainda precisam ser desenvolvidos modelos multiagentes que considerem a ação quando da presença de restrições no uso do recurso, no acesso a este recurso ou que avaliem como os agentes constróem estratégias de exploração dos recursos tendo restrições⁸ de acesso aos impostas pelo Estado. Este tipo de desenvolvimento é adequado para estudar as condições de funcionamento do setor florestal brasileiro, mais especificamente a exploração de florestas nativas na Amazônia brasileira. Neste caso, a ilegalidade dos processos de exploração tem um peso grande na produção total de madeira na região (cerca de 67% (HUMMEL, 2001)). O impacto de estratégias que combinem um aumento da fiscalização e da repressão à atividade ilegal com mecanismos de aumento da eficiência do processo produtivo ou dos preços no mercado local, nacional e internacional ainda está para ser avaliado.

⁸O que se chama aqui *condições subsidiárias*

2.2.1 Arcabouços de Simulação Multiagentes

Sistemas multiagentes, dentro da perspectiva da IA são definidos por Durfee et al. (DURFEE; et al, 1989) como: “*A loosely coupled network of problem solvers that work together to solve problems that are beyond their individual capabilities*”⁹ Neste contexto se inserem as ferramentas de simulação multiagentes. No Santa Fe Institute (SFI) foi produzido o Swarm (MINAR, 1996). Outros arcabouços de *software* que implementam a mesma noção de agente são o CORMAS (CIRAD, 2001; BOUSQUET, 2001a) e o RePast¹⁰

A idéia de agentes que utilizem algoritmos adaptativos em simulação computacional tem em John Holland a sua grande inspiração. É um trabalho de 1991 (HOLLAND; MILLER, 1991) que propõe o uso de agentes adaptativos artificiais para a construção de simulação econômica. Este trabalho pioneiro propõe a idéia de uma economia como um sistema dinâmico evolutivo complexo que consiste de uma rede de agentes em interação. Esta rede exhibe um comportamento dinâmico agregado que emerge das atividades individuais dos agentes. Este comportamento agregado do sistema pode ser descrito sem um conhecimento detalhado do comportamento dos agentes. Os agentes, neste tipo de sistema conseguem atribuir a suas ações algum tipo de valor (lucro, retorno, utilidade, fitness, etc.) e agem sempre no sentido de aumentar o valor deste resultado. Estes agentes estão sempre em interação com outros. O sistema geralmente opera longe de qualquer ótimo global.

⁹“Uma rede fracamente acoplada de solucionadores de problemas que trabalham juntos para resolver problemas que estão além de suas capacidades individuais”

¹⁰<http://repast.sourceforge.net>

Esta abordagem tem como consequência a construção de modelos que permitem um *mapeamento* mais preciso das características dos problemas observados. Levando potencialmente a modelos de maior poder explicativo para aos sistemas em questão.

O uso de agentes adaptativos em simulação tem se disseminado nos últimos anos. Um aspecto importante tem sido o seu uso na simulação ambiental. Exemplos deste tipo de abordagem podem ser vistos numa edição especial do *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* que foi dedicada especificamente à relação entre modelagem baseada em agentes, teoria dos jogos e gerenciamento de recursos naturais (BOUSQUET, 2001b). Um um dos artigos desta revista (THÉBAUD; LOCATELLI, 2001) utiliza agentes para modelar o surgimento de convenções para o compartilhamento de recursos naturais. Outro estudo (DORAN, 2001), discute o uso de agentes para simular cenários de gerenciamento de recursos naturais que permitam aos participantes de procesos de negociação sobre o uso destes recursos uma avaliação das consequências de diferentes acordos que podem ser estabelecidos. Os agentes artificias, neste caso, são utilizados para incentivar o surgimento de estratégias cooperativas. Outro artigo (DEADMAN; SCHLAGER; GILBERT, 2001) utiliza agentes para modelar diversos cenários de uso de recursos comuns em diferentes ambientes institucionais.

Neste trabalho serão analisadas rapidamente três das ferramentas utilizadas para modelagem e simulação multiagentes. Estas ferramentas são analisadas visto que suas características em parte inspiraram o arcabouço de simulação implementado. O *Arcabouço* utilizado aqui é baseado no trabalho do grupo de Agentes do Laboratório

de Sistemas de Conhecimento da Universidade Federal de Santa Catarina (LSC-UFSC). Este arcabouço é um desenvolvimento de uma ferramenta chamada *Mundo dos Atores* (MARIANI, 1998). Esta ferramenta foi posteriormente modificada para permitir a sua implementação para simulação e para a sua utilização em outros sistemas operacionais além do *Windows*. Também são vistas algumas diferenças entre as ferramentas resenhadas e o arcabouço de simulação multiagentes implementado.

2.2.1.1 Swarm

O *Swarm* é uma ferramenta implementada a partir do trabalho pioneiro de um grupo associado ao *Santa Fe Institute*, de Santa Fe, EUA. Esta ferramenta de *software* tem como objetivo implementar "... a general purpose framework for simulating concurrent distributed artificial worlds" ¹¹ (BUCKHART, 1997). O *Swarm* pode ser definido, segundo (MINAR, 1996) como "... a multiagent software platform for the simulation of complex adaptive systems" ¹². Esta ferramenta implementa formalmente seus modelos como uma coleção de agentes independentes interagindo via eventos discretos. Agente, para o *Swarm* é uma entidade que pode gerar eventos que afetam a ela e a outros agentes. Agente, então, é a unidade básica de uma simulação no *Swarm*. Agentes interagindo consistem em uma simulação. Para uma definição mais precisa da noção de agente para simulação econômica ver (RIVERO, 1999), especialmente o capítulo 5.

Agente é a unidade de simulação do *Swarm*. Modelos em *Swarm* são coleções

¹¹um arcabouço de propósito geral para a simulação de mundos artificiais concorrentes distribuídos

¹²...uma plataforma de *software* multiagentes para a simulação de sistemas adaptativos complexos

de agentes interagindo via eventos discretos. A principal inspiração do Swarm vem do campo da “*vida artificial*”, que é um ramo da biologia fortemente baseado em simulação discreta.

As principal motivação do Swarm é a necessidade de lidar com a complexidade de um ambiente mutuamente recursivo gerado pela interação de entidades autônomas interagindo. Este ambiente está em qualquer tipo de processo de interação estratégico (HARSANYI, 1967). Então, uma das maneiras de tratar esta complexidade e dinâmica global surgida deste tipo de interação é uma abordagem de simulação (DANIELS, 2003).

O Swarm surgiu como uma ferramenta de simulação que permitia lidar com este tipo de processo complexo sem que os pesquisadores necessitassem começar a implementação dos modelos “do zero”. O Swarm provê a implementação de uma “infra-estrutura computacional para gerenciar e avaliar entidades autônomas de uma maneira precisa e reproduzível” (DANIELS, 2003).

O Swarm está baseado numa “máquina virtual”. Esta máquina virtual permite ao pesquisador “decrever o comportamento dos agentes um a um” (DANIELS, 2003). Também pode-se também construir e compor hierarquia de agentes. Esta característica permite que se estude composições de agentes como agentes únicos.

Outro elemento fundamental no Swarm é o cronograma (*schedule*) que permite a explicitação do *tempo* no modelo. um *schedule* é “...uma estrutura de dados que combina ações na ordem específica em que devem ser executadas” (BUCKHART, 1997).

Uma idéia implementada pelos desenvolvedores do Swarm que posteriormente foi incorporada em outros ambientes simulação multiagente é o *Observador (Observer)*. Um observador é um tipo especial de agente preparado para capturar dados da aplicação implementada sem que esta “observação” tenha impacto na execução da simulação.

A implementação do Swarm usa orientação a objetos como abordagem de programação. O uso de ferramentas de simulação baseadas em agentes ou indivíduos que utiliza Programação Orientada a Objetos (POO) como abordagem de simulação (LOREK; SONNENSCHNEIN, 1997; BEECHAM; FARNSWORTH, 1998) tem se generalizado pelo fato de que a POO é uma técnica que permite um reaproveitamento de código bastante eficaz. Além disso, a modelagem de componentes de *software* com algum grau de autonomia (como é o caso da POO) é uma representação que está bastante próxima da abordagem da simulação multiagentes.

2.2.1.2 RePast

RePast (COLLIER, 2003) é um arcabouço de simulação criado pelo *Social Science Research Computing* da Universidade de Chicago. O nome (RePast) é um acrônimo de “*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*”¹³. Este nome complicado supõe que as simulações baseadas no RePast serão mais adequadas para estudos em sistemas sociais. Os atores sociais no RePast são vistos como entidades que têm sistemas de crenças que podem ser transformados pela interação com outros atores (são, portanto, permeados e entrelaçados). Estes sistemas necessariamente

¹³Instrumental de Simulação de Agentes Porosos Recursivos

consideram os outros agentes como parte dos seus processos de raciocínio e como componentes da sua decisão (daí o “recursivo”). Neste sentido, não só indivíduos são considerados agentes, mas organizações e instituições também podem ser vistas pelo mesmo prisma de “construções sociais recursivas”. Uma advertência do autor é que esta visão do *software* ainda não está plenamente implementada. Ainda é um arcabouço em desenvolvimento.

Este arcabouço é desenvolvido em *Java*, e também permite a criação de sistemas multiagente de simulação. O arcabouço consiste num conjunto de bibliotecas de *software* para “criar, executar, mostrar e coletar dados de uma simulação baseada em agentes” (COLLIER, 2003). O RePast pode gravar “filmes” da simulação sendo executada e incorpora uma série de bibliotecas java para computação científica.

O RePast usa a mesma metáfora da simulação discreta que o Swarm e considera uma simulação como uma máquina de estados finitos. Esta máquina de estados finitos é constituída pelos estados de todos os componentes incluídos na simulação. É uma implementação que segue também a abordagem “bottom-up” correntemente utilizada para a maior parte das simulações que usam a noção de agente como sua base de implementação. O RePast tem duas partes constituintes básicas *infra-estrutura* e *representação*. Infra-estrutura é o conjunto de componentes de *software* que é implementado no arcabouço (as classes java do arcabouço de simulação). Representação são os componentes implementados pelo modelador. A representação, em outras palavras, é o conjunto de modelos de simulação (como classes java) que o usuário do arcabouço implementa. Um *estado* em uma simulação representa os

valores das *variáveis de instância* dos objetos implementados (os Agentes, e outros objetos implementados). O RePast implementa a mesma idéia do Swarm de uma *Schedule* que permite que cada agente execute sua “agenda”. O uso de POO e o fato do código da implementação ser aberto permitem que o arcabouço de simulação possa incorporar novos componentes de *software* (i.e. o arcabouço é “extensível”). Isto permite uma grande flexibilidade para a ferramenta.

2.2.1.3 Cormas

O CORMAS (CIRAD, 2001) é da mesma família de ambiente de simulação multiagentes do Swarm e Repast. A especificidade dele é que sua construção e as classes que ele implementa são adequadas para a elaboração de modelos de simulação no domínio de gerenciamento de recursos naturais. O arcabouço de simulação é composto de três módulos básicos:

1. No primeiro módulo se define os agentes e as interações entre estes agentes. Estas interações são efetuadas pela passagem de mensagens entre os agentes. Cada agente tem os mecanimos necessários para processar estas mensagens.
2. No segundo módulo é feito o controle da dinâmica global do sistema. Este módulo controla os eventos que ocorrem durante o processo de simulação. Neste módulo está a implementação das estruturas de passagem do tempo para a implementação da simulação a eventos discretos.
3. No terceiro módulo estão as estruturas encarregadas de fazer a interface entre a simulação que está sendo executada e a sua visualização. Tem o papel do *Ob-*

servador do Swarm. Ele efetua a integração entre o “processo de modelagem” e seus “modos de representação” (CIRAD, 2001).

O arcabouço de simulação também usa POO na sua implementação. A implementação utiliza a Linguagem SmallTalk e fornece as classes genéricas necessárias para a construção dos modelos multiagentes. A implementação deste modelos é feita, como especialização das classes básicas fornecidas. Neste sentido, tanto o CORMAS quanto o RePast e o Swarm são arcabouços de simulação abertos e extensíveis. Todos eles baseam-se em linguagens orientadas a objeto para a sua implementação. O Cormas é implementado na plataforma VisualWorks (uma implementação de SmallTalk).

2.2.1.4 Características de Arcabouços de Simulação Multiagentes

Estes três arcabouços de simulação discutidos acima têm muitos aspectos em comum. O primeiro aspecto que une os três é o fato de serem implementados em linguagens de programação interpretadas¹⁴. Isto se deve ao fato de que, em uma linguagem interpretada é mais simples implementar componentes de *software* que executem um código que não foi previamente compilado junto com o módulo que está sendo executado. Este tipo de solução é necessário para a produção de um tipo de componente que é comum em todos os três arcabouços analisados, que é a estrutura de *Schedule*. É esta estrutura que permite a interpretação dos módulos de *software* implementados como ações dos Agentes na simulação.

Um outro aspecto comum nos três arcabouços de simulação é o fato de que

¹⁴Swarm em ObjectiveC e Java, RePast em Java e CORMAS em SmallTalk

todos eles separam a execução dos modelos simulados da coleta de dados gerados pelo modelo (*Observação*). Isto é crítico em modelos de simulação a eventos discretos pelo fato de que, se não há um controle preciso do *ponto no tempo* onde os resultados da simulação são coletados, isto pode levar a eventuais imprecisões ou incorreções, visto que o processo de interação dos agentes é discreto e os valores de cada objeto (os *estados do mundo*) podem mudar significativamente de um momento do tempo para outro. Então, todos os arcabouços implementam um componente de *software* independente para a observação e o executam no intervalo *entre* dois “clics” do tempo.

Por último todos os modelos implementam esquemas de comunicação dos agentes. Estes esquemas são, para os modelos, a passagem de mensagens de um agente para outro. Este esquema é mais bem desenvolvido no CORMAS. Este esquema de passagem de mensagens é crucial para a implementação do paralelismo simulado do modelo. Estes esquemas, porém, não são suficientes para a que se possa implementar o paralelismo real dos modelos de simulação, i.e., estes modelos não podem ser executados em uma máquina paralela sem implementações que explicitamente permitam a distribuição da execução das Schedules dos agentes em vários processadores. Este tipo de implementação modifica criticamente o componente de *software* responsável pela execução dos Schedules dos agentes.

2.3 Sim(2ECO) - O Arcabouço de Simulação

As classes básicas do arcabouço de simulação desenvolvido para este trabalho foram implementadas em 1999 (RIVERO, 1999; RIVERO; STORB; WAZLAWICK, 1999) a partir de um ambiente para ensino de Programação orientada a objetos desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Conhecimento (LSC) do Departamento de Informática e Estatística da UFSC pelo professor Antônio Carlos Mariani (MARIANI, 1998): o *MundoDosAtores*, implementado em SmallTalk. A partir das classes do *MundoDosAtores* foi implementado o ambiente multiagentes de simulação discreta. Em 2000 e 2001 as classes do Ambiente de Simulação discreta foram convertidas para uma nova versão de SmallTalk para permitir uma maior independência de sistema operacional. O Ambiente de Simulação Discreta incorpora idéias inicialmente desenvolvidas no Swarm (MINAR, 1996). O sistema implementa um esquema de simulação discreta onde cada agente executa a sua *Agenda (Schedule)*. Após a execução das agendas é executada a observação pela classe **Observer**. O Diagrama de classes do Ambiente de simulação é apresentado abaixo (Figura 1). Este diagrama mostra as classes básicas utilizadas no arcabouço.

2.3.1 As Classes do Sim(2ECO)

A principal classe do ambiente é a classe **WorldOfActors**. Um objeto *WorldOfActors* (o Mundo) é o *container* para todos os outros objetos que participam de uma simulação. A simulação é executada utilizando a classe **DiscreteEventSimulation**. É esta classe que controla todo o processo de execução da simulação a eventos dis-

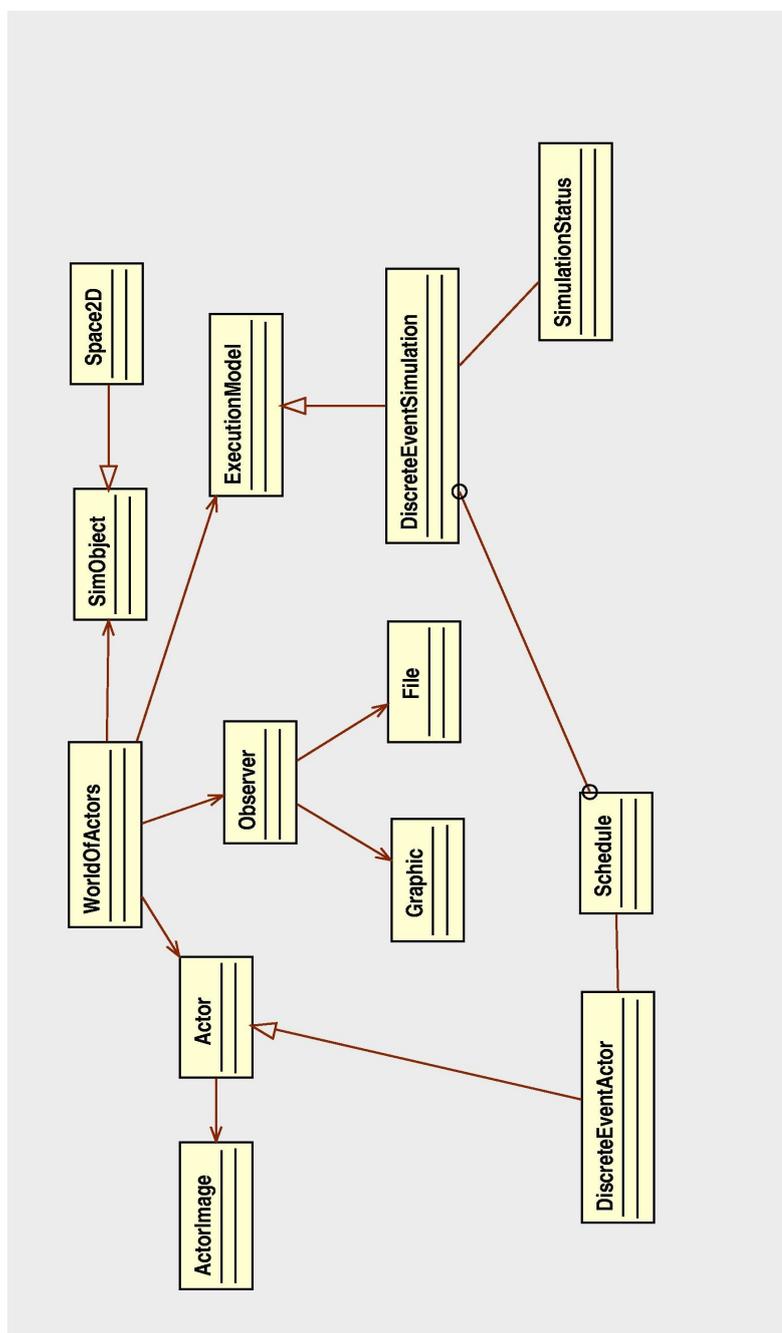


Figura 1: Classes Básicas do Arcabouço de Simulação

cretos. Num objeto da classe `DiscreteEventSimulation` é que está ligada a janela de controle da simulação. O método que executa a simulação é `start`.

O método *start* tem a seguinte estrutura:

```

start
"Private - Start the execution of the model."
+-----PRE SIMULATION-----+
| animating _ true.
| self owner observers
|   do: [:observer | observer initializeObserver].
|
| self preSimulation.
+-----+

+-----SIMULATION-----+
| processes
| add: ([[animating]
|   whileTrue: [self owner insertNewActors.
|
|   +-----PRE SIMULATION STEP-----+
|   | self preSimulationStep.
|   +-----+
|
|   +-----SIMULATION STEP -----+
|   | self owner actors
|   |   do: [:actor |
|   |     |
|   |     +-----SCHEDULE EXECUTION-----+
|   |     | actor preExecSchedule;
|   |     | executeSchedule;
|   |     | postExecSchedule].
|   |     +-----+
|   |
|   | +-----OBSERVATION-----+
|   | | self owner observers
|   | |   do: [:observer | observer observe].
|   | +-----+
|   |
|   | time _ time + 1.
|   | simulationStatusMorph time: time.
|   +-----+
|
|   +-----POST SIMULATION STEP -----+
|   | self postSimulationStep]]
|   +-----+
|
| forkAt: Processor userBackgroundPriority)
+-----+

```

- PRE-SIMULATION - Esta parte do método é executada antes do início de uma simulação. Os observadores são inicializados e algum código que precise ser executado antes da simulação está contido no método `preSimulation`.
- SIMULATION - Nesta parte do método é executada a simulação propriamente dita. Esta simulação é executada um determinado número de vezes ou eventualmente é interrompida pelo usuário. A cada instante de tempo é executado um `SIMULATION-STEP`. Um `SIMULATION-STEP` é subdividido em três partes:
 - PRE-SIMULATION-STEP - Nesta parte do código são executados os métodos que preparam um “clic” do tempo. Preparam as condições para a execução de um passo de simulação.
 - SIMULATION-STEP - Nesta parte do código são executadas as *Schedules* dos agentes. Cada agente presente na simulação executa uma *preSchedule*, a *Schedule* propriamente dita e uma *postSchedule*. Após a execução da *Schedule* de todos os agentes também são executadas as *observações* e o intervalo de tempo é modificado.
 - POST-SIMULATION STEP - Aqui são executados eventuais métodos necessários após o passo de simulação.
- POST-SIMULATION - Neste método são executados eventuais processos necessários após o fim da simulação (como coletas de dados ou métodos para “coleta de lixo”). O método `postSimulation` é executado após o encerramento de uma simulação (no método `stop` da classe `DiscreteEventSimulation`).

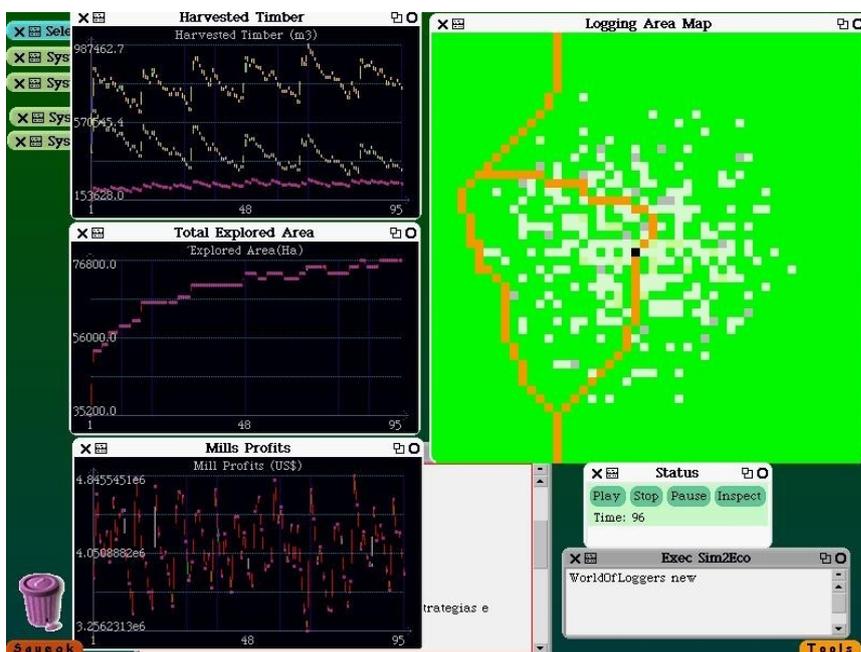


Figura 2: Visão típica da execução de uma simulação

Esta estrutura controla a execução de uma simulação multiagentes. Na classe `WorldOfActors` está a coleção de agentes da simulação. A cada iteração do mundo cada agente nesta coleção executa a sua *Schedule*. A figura 2 mostra a execução de uma simulação típica. Pode-se ver nesta figura os gráficos que apresentam no “tempo-real de simulação” os resultados para algumas variáveis. Estes gráficos são gerados por objetos da classe `Observer` (Observador). Estes objetos executam após as *Schedules* dos Agentes. Um observador, assim como no *Swarm*, é um componente que permite a recuperação de informações dos atores durante um processo de simulação a eventos discretos sem interferir nesta execução. São os objetos da classe `Observer` que possibilitam a visualização e gravação em arquivos dos dados de uma simulação.

Pode haver mais de um observador em uma simulação. Isto permite agregar fa-

almente novas rotinas de observação e incorporar novas “formas de observação” (ou “modos de representação”, na perspectiva dos autores do CORMAS) a uma simulação. Os observadores podem gerar, além de gráficos, arquivos que podem ser posteriormente tratados em algum *software* estatístico. O arcabouço implementado não tem rotinas para o tratamento estatístico dos dados, estas rotinas podem ser acrescentadas no *software*, mas, avaliou-se que o esforço de implementação destas rotinas é desnecessário visto que este tipo de rotina e pacote de *software* é facilmente encontrável como código aberto ou em pacotes de *software* específicos.

Um dos aspectos fundamentais na construção do **Sim(2ECO)** é o uso de software livre com código aberto em todos os componentes do software. A linguagem de implementação do ambiente de simulação é o *Squeak SmallTalk*¹⁵ que é uma implementação de código aberto do *SmallTalk80*. O *squeak* é um projeto colaborativo que tem como líderes alguns dos criadores da linguagem SmallTalk. Este programa pode rodar na maioria das plataformas de sistema operacional existentes atualmente no mercado.

As classes que permitem a geração de gráficos (o pacote Plot) e o pacote que permite o uso de algoritmos genéticos (Genetic) no **Sim(2ECO)**, foram criadas por Diego Gomez-Deck. Um compromisso derivado do fato desta ferramenta ser de código aberto com uso de código fornecido por outros autores, é a sua disponibilização gratuita. Uma vantagem deste tipo de abordagem é que o código é inteiramente extensível, não há nenhuma restrição à alteração de componentes da Linguagem (inclusive da máquina virtual). É claro que é requisito fundamental neste tipo de

¹⁵<http://www.squeak.org>

projeto manter a compatibilidade com a estrutura padrão da linguagem.

2.3.2 Implementação do Agente Adaptativo Artificial

Um modelo de agente adaptativo para a simulação utilizado neste trabalho foi desenvolvido a partir do agente definido em (RIVERO; STORB; WAZLAWICK, 1999; RIVERO, 1999). O agente utiliza uma função de utilidade esperada para a avaliação das estratégias e um algoritmo genético para evoluir suas estratégias de coleta de madeira.

O componente fundamental na simulação é a classe `Actor` (figura 1). Sua sub-classe `DiscreteEventActor` é responsável pela implementação dos agentes. Um objeto da classe `DiscreteEventActor` possui uma agenda (um objeto da classe `Schedule`) que é executada a cada iteração do *mundo*.

Cada agente tem uma *agenda (Schedule)* (figura 3) que ele executa a cada iteração do processo de simulação. `Schedule` é uma classe implementada no ambiente de simulação. Cada agente (um objeto da classe `DiscreteEventActor` tem um objeto da classe `Schedule` como variável de instância. Na criação do Agente (método `initialize`) a `Schedule` também é inicializada. Os métodos do agente que serão executados no passo de simulação são incluídos no método `script`.

A estrutura *Schedule*, então incorpora chamadas a métodos implementados na classe `Actor` que estão no método `script`. Estes métodos são chamados a partir de um protocolo específico (Definido na sua maior parte pelo prof. Antônio C. Mariani¹⁶ e posteriormente traduzido e ampliado para o simulador em *Squeak*). O

¹⁶Comunicação pessoal

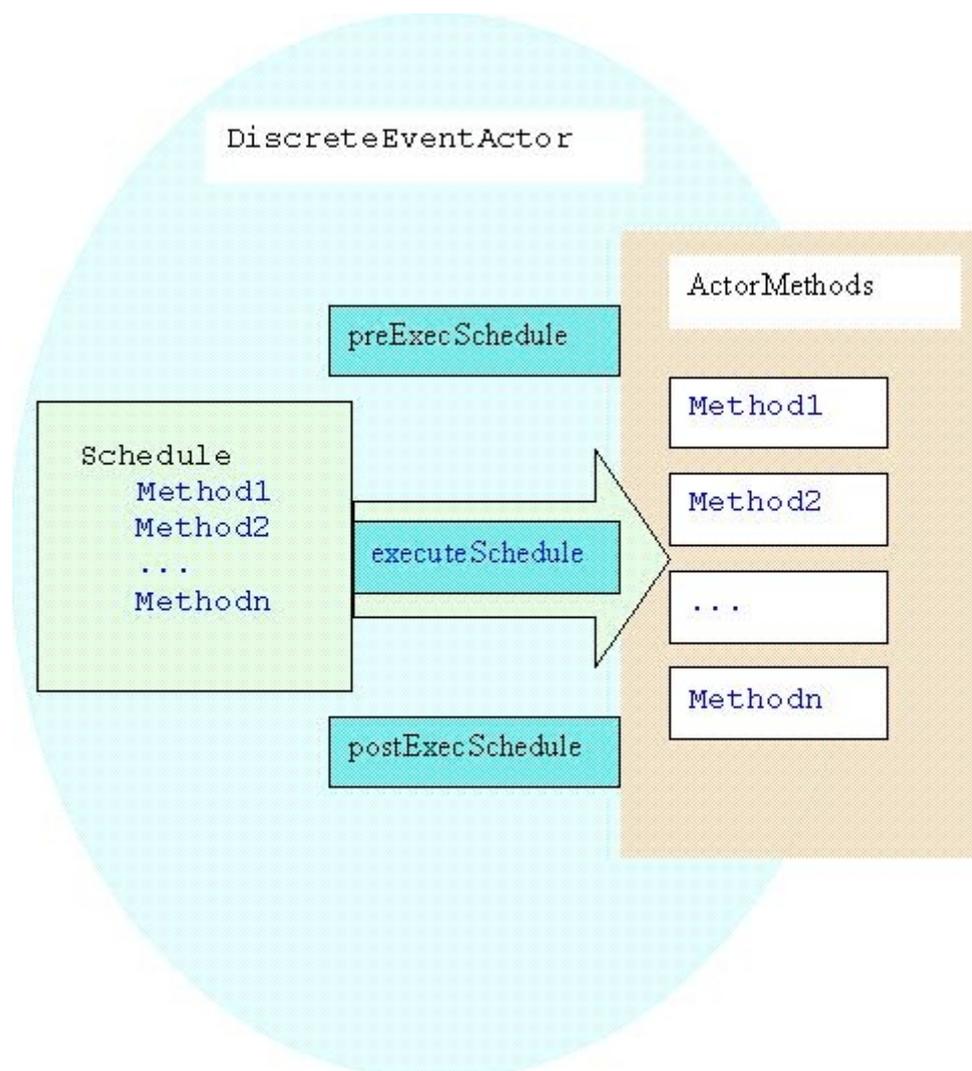


Figura 3: Visão simplificada do Agente

protocolo da classe *Schedule* (tabela 1) permite que se implemente uma estrutura de execução de métodos previamente definidos no agente com um controle possível sobre o tempo de simulação e as condições de execução dos métodos. Ou seja, é possível, na *schedule* de cada agente (feita no método `script`), se utilizar instruções condicionais ou determinar momentos específicos no tempo de simulação para a execução destes métodos.

Para a implementação de eventuais “processos adaptativos” no agente, é necessário incluir em algum método acessado pela *Schedule* do agente a execução do algoritmo adaptativo. No caso específico dos agentes implementados, isto é feito através de um método que executa o algoritmo genético que é um objeto incorporado como uma variável de instância de cada agente. Cada agente, então, tem um algoritmo adaptativo que ele executa e um conjunto de dados que correspondem ao “estado do mundo” que ele consegue observar naquele instante. Não há nenhum requisito para que este conjunto de dados seja igual para todos os agentes. Um agente também tem uma função utilidade (Um objeto da classe `UtilityFunction`) que é usada para avaliar os resultados de suas ações. Esta função é utilizada, no modelo implementado, como a função de *fitness* do algoritmo genético.

2.3.3 O Uso de Algoritmos Adaptativos no Modelo

A função utilidade mapeia os estados do mundo e permite o estabelecimento de uma ordem de valores calculados a partir destes estados. *Funções utilidade* são as que a teoria usualmente tem tratado como as funções de otimização dos agentes. Não há, porém, nenhuma restrição sobre qual o tipo de função que o agente pode

Tabela 1: Protocolos da Classe Schedule

Mensagem	Comportamento do método	observação
alwaysDo: aBlock	Executa incondicionalmente aBlock (um bloco de código)	É o método de schedule mais usado
at: anInteger andEach: otherInteger do: aBlock	A partir de anInteger unidades de tempo e a cada otherInteger unidades de tempo aBlock é executado. O tempo é medido em relação ao instante inicial da simulação.	
at: anInteger do: aBlock	Em anInteger unidades de tempo aBlock é executado. O tempo é medido em relação ao instante inicial da simulação.	
each: anInteger do: aBlock	A cada anInteger unidades de tempo aBlock é executado. O tempo é medido em relação ao início da simulação	
empty	Remove todos os eventos do schedule	
execute	Avalia as condições e executa aquelas ações cujas condições estejam satisfeitas.	Método privado
when: booleanBlock do: actionBlock	Adiciona um novo par(condição, ação) no final da lista de eventos a serem executados	Método privado
whenever: booleanBlock do: actionBlock	Sempre que a condição expressa por booleanBlock for verdadeira, actionBlock é executado.	
withProbability: aFloat do: aBlock	aBlock é avaliado com uma probabilidade de aFloat (uma valor entre 0 e 1) em cada unidade de tempo.	

otimizar na implementação computacional. Esta necessidade é dada pelo fato de que o algoritmo genético é um mecanismo de busca que é dirigido por uma *função de desempenho*¹⁷ qualquer. Esta função pode ser o resultado dos componentes do *ambiente* onde o agente está inserido ou de algum tipo de mecanismo interno do agente. Usualmente funções deste tipo (*fitness*) produzem algum tipo de *ordem parcial* a partir de variáveis que o agente consegue observar ou antecipar.

No caso de modelos que considerem o comportamento de agentes com algum grau de realismo, é necessário produzir também algum mecanismo que permita a antecipação de estados do mundo. Estes mecanismos antecipatórios são necessários se os agentes modelados têm as suas funções objetivo baseadas na formação de expectativas. Os agentes tendo esta função de expectativas e a função utilidade podem estabelecer qual, dentre o conjunto de estados do mundo possíveis¹⁸, é o estado que tem o maior valor (ou a maior utilidade). Não há nenhuma garantia de que este estado de mundo seja um ótimo global. Nem mesmo a garantia que o estado do mundo antecipado vá se concretizar. Neste sentido que é importante a idéia de *estratégia* e a sua versão dinâmica *estratégia evolucionária*. Um agente estabelece um conjunto restrito de estratégias que ele pode utilizar e aplica, dentre as estratégias que ele conhece, aquela que lhe dá o melhor retorno esperado. Como é plausível supor que as funções de previsão do agente são imperfeitas ou incompletas (não podem antecipar todas as possibilidades), o *retorno esperado* não necessariamente é o retorno que o agente obtém. Uma solução inspirada na teoria dos jogos evolucionários é o

¹⁷fitness function

¹⁸Ou dos estados que o agente tem capacidade para antecipar, dadas as restrições na sua racionalidade

agente tentar conjuntos diferentes de estratégias (que a teoria dos jogos chama de estratégias puras) e combinar a sua aplicação de diversas maneiras como estratégias mistas.

A maneira utilizada neste trabalho para evoluir estas estratégias é o algoritmo genético (HOLLAND, 1975). Um algoritmo genético é um mecanismo adaptativo inspirado em processos biológicos. Um algoritmo genético é um componente de *software* que pode encontrar ótimos locais ou globais de funções com uma relativa independência da sua complexidade ou dimensionalidade. Um algoritmo genético pode ser classificado como um processo de busca baseado em um processo estocástico de geração de indivíduos que é dirigido por uma função de *fitness*. Uma explicação detalhada das características, estrutura, funcionamento e aplicações dos algoritmos genéticos pode ser encontrada no ótimo livro de David Goldberg (GOLDBERG, 1989).

2.3.4 Problemas em aberto, armadilhas, dificuldades, críticas

Modelagem baseada em agentes (MBA) ainda é um campo em desenvolvimento. Ferramentas computacionais largamente aceitas e técnicas formais (matemáticas, lógicas e estatísticas) para a validação dos modelos produzidos ainda são um objeto de discussão. As abordagens mais aceitas de MBA servem apenas como “experimentos do pensamento” (COUCLELIS, 2001), em vez de serem instrumentos que permitam endereçar as questões de interação entre ambiente e agentes. Esta dificuldade, quando se trata da discussão de mudança de uso do solo, emerge pelo fato de que, modelos adequados para prever a dinâmica do uso do solo, para Couclelis

(COUCLELIS, 2001, pp.4-5) não tem ainda uma teoria formal que os apoie (sendo eles baseados em agentes, ou não). Isto é, a inexistência de uma teoria formal que permita explicar a estrutura de processos de mudanças do uso do solo impõe aos modeladores ¹⁹ um desafio que ainda está longe de ser superado.

Uma resposta possível a este desafio está exatamente no fato de que estes “instrumentos de pensamento” baseados em agentes podem ser úteis para ampliar a nossa capacidade de experimentar com a dinâmica que surge quando um conjunto muito grande de elementos interagindo de uma maneira reflexiva. Ou seja, MBA serviriam como “laboratórios” computacionais para produzir novas perspectivas e idéias teóricas sobre as propriedades estruturais e dinâmicas de sistemas complexos. Mais que, num primeiro momento, tornar-se um meio de suporte à decisão ou um instrumento de previsão, as implementações computacionais baseadas em agentes teriam o papel de abrir novos horizontes de investigação que permitissem a construção de uma teoria formal explicativa da dinâmica de sistemas complexos.

¹⁹Não só aos de agentes, mas aos modeladores em geral.

3 Modelos para a Exploração Madeireira na Amazônia

Este capítulo discute a atividade madeireira como um problema sócio-econômico-ecológico.

Inicialmente discute-se o impacto da atividade madeireira o desmatamento e suas características como um problema econômico.

Resenha-se alguns modelos sobre desmatamento da Amazônia com foco especial sobre a atividade madeireira.

Discute-se o modelo de Steve Stone sobre a indústria.

3.1 A Atividade Madeireira e a Floresta como um Problema Ecológico e Econômico

A atividade madeireira na Amazônia está inserida no contexto da discussão sobre desmatamento em florestas tropicais. Usualmente é vista, nesta discussão, como um fator a mais na destruição ou empobrecimento dos recursos naturais (essencialmente, a floresta). A atividade madeireira tem o potencial de afetar áreas relativamente grandes de floresta. Johns, Barreto e Uhl (JOHNS; BARRETO; UHL, 1996), em

um estudo feito em Paragominas, no estado do Pará, estimam que, na atividade madeireira com práticas de coleta não planejada, para cada árvore derrubada são afetadas mais de 16 árvores com $dap \geq 10cm$. Cada árvore derrubada afeta uma área $\cong 488m^2$. Estes impactos, implicam numa área afetada pela atividade que pode variar entre 10.000 e 15.000 km^2ano^{-1} para o total da região Amazônica (NEPSTAD, 1999). Estes impactos tornam a atividade madeireira um aspecto importante na discussão sobre como o empobrecimento e os danos provocados na Amazônia podem afetar a quantidade, distribuição e diversidade de espécies de fauna e flora em toda a região.

A atividade madeireira pode também tornar a floresta mais suscetível ao fogo e, conseqüentemente, aumentar mais ainda o grau potencial de destruição da atividade humana sobre a floresta. Em Rondônia, por exemplo, os autores estimam (NEPSTAD, 1999) que a floresta afetada pela atividade madeireira esteve no intervalo de 1320-1920 km^2 no período de 1997-1998, de uma área total de 212.214 km^2 , o que corresponde a mais de 0,5% de floresta afetada por ano. Na Amazônia, os autores estimam que a área de floresta afetada pela atividade madeireira acrescenta, na melhor das hipóteses, 9.730 km^2 de florestas perturbadas por ano, o que corresponde a 50% a mais de florestas afetadas em relação ao desmatamento total ($\cong 18.000km^2ano^{-1}$)¹.

A atividade madeireira pode ser considerada, portanto, um componente fundamental no problema ecológico da perturbação da floresta Amazônica pela atividade humana. Mesmo uma atividade madeireira com manejo e impacto reduzido

¹Dados do INPE apontam um desmatamento crescente de 2001/2002 de $\cong 25.000km^2ano^{-1}$

ainda é potencialmente perturbadora². O estabelecimento de práticas de manejo menos insustentáveis pode ser uma medida importante para diminuir o impacto da atividade humana sobre a floresta. Esta mudança na trajetória da indústria, no entanto, necessita ter uma base forte nas práticas econômicas e empresariais da própria indústria. A indústria madeireira tem uma história na região, desenvolveu práticas de exploração e padrões de rentabilidade. Tem também um padrão de investimento de capital que precisa ser conhecido e entendido. Tem, como qualquer setor industrial, uma dinâmica espacial que, no seu caso, está diretamente ligada às fontes de matéria-prima (a madeira). E a sua lógica econômica não pode fugir da limitação que os custos de transporte da matéria-prima em estado bruto (a madeira em tora) impõem e que podem ser críticos na decisão de localização e volume de capital investido na atividade.

A atividade madeireira está também diretamente associada aos processos de ocupação humana da região. O acesso à matéria-prima implica em ter estradas, adquirir áreas de exploração e/ou na existência de pessoas que vendam a madeira a ser processada. Para funcionar, as madeireiras precisam garantir a disponibilidade da matéria-prima no volume adequado, numa distância adequada, com condições de transporte razoáveis. É a partir destas condições que os proprietários das madeireiras podem determinar os volumes de investimento de capital e a rentabilidade esperada da atividade.

Outro aspecto importante, que é objeto deste trabalho são as abordagens de

²Johns, Barreto e Uhl (JOHNS; BARRETO; UHL, 1996) estimam que as práticas de manejo de impacto reduzido afetam uma área de $370m^2$ por árvore derrubada

modelagem para a indústria madeireira. Uma avaliação dos modelos existentes é um ponto de partida importante para a construção de um modelo que possa ser adequado para captar a dinâmica das decisões da indústria e, se possível, os impactos da estrutura da indústria e das políticas públicas sobre estas decisões individuais. Assim, o ponto de partida deste capítulo é uma revisão sobre os modelos que tratam da indústria madeireira.

3.2 Modelos Econômicos de Desmatamento: o Papel da Atividade Madeireira)

Apesar dos problemas epistemológicos envolvidos na atividade de modelagem ela tem tido uma importância grande na discussão recente sobre os “futuros possíveis” da floresta na Amazônia. Um ponto de partida importante na discussão sobre os modelos econômicos do desmatamento é o trabalho de David Kaimowitz e Arild Angelsen (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998). Este trabalho resenha “*as suposições, a metodologia, os dados e principais conclusões*” de 150 modelos do deflorestamento nos trópicos. O trabalho restringe-se a modelos econômicos, que tenham como base o comportamento dos proprietários de terra, suas causas e as conexões das suas decisões com o resto da economia.

A visão dos autores (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998) sobre “desflorestamento” não inclui o corte seletivo de madeira. Para os autores, este tipo de atividade não constitui a “eliminação completa, de longo prazo da cobertura vegetal” (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998, p.3). Os autores também colocam no texto o importante problema das diferenças das percepções de benefícios e custos sociais no curto e

longo prazos, local e globalmente. Para os autores, os benefícios do desflorestamento a nível local e nacional podem ser mais altos que seus custos nestes mesmos níveis. Os custos sociais deste processo, muitas vezes acontecem (ou são percebidos) apenas no nível global (como por exemplo, o aumento das emissões de carbono das regiões de ocupação recente). Os agentes que ocupam a floresta, quase sempre não pagam pelas *externalidades negativas* associadas à sua destruição, nem mesmo a nível nacional. O problema da *internalização da externalidades*, porém, tem mais facetas do que a simples inclusão dos custos ambientais do desmatamento. As *externalidades positivas* da preservação da floresta também não são incluídas como benefícios aos produtores que eventualmente fazem dela um uso menos insustentável.

Os autores concluem que os preços da madeira, nos modelos analisados têm uma relação positiva com o desflorestamento. Quando os preços da madeira são mais altos o desflorestamento tende a ser maior. Para os autores, uma das maiores dúvidas existentes que está relacionada ao setor de produtos madeireiros e aos produtos florestais em geral é a estabilidade da propriedade da floresta e da terra (*land and forest tenure*) estas relações ainda não estavam esclarecidas e necessitavam de maior pesquisa.

Uma das recomendações dos autores é uma maior atenção aos aspectos institucionais e à modelagem da larga escala no uso da terra, especialmente fazendeiros e grandes empresas madeireiras.

Nos modelos resenhados pelos autores a principal *variável dependente* é o *volume e localização do desflorestamento*. Este volume depende de *agentes* que são

os responsáveis pelas mudanças no uso do solo. As decisões dos agentes afetam o uso do solo e são baseadas nas suas *variáveis de escolha*, que são essencialmente endógenas. Outro aspecto da decisão dos agentes são os *parâmetros de decisão*, que são variáveis exógenas do processo para a maioria dos modelos (exceto para os modelos de equilíbrio geral). As variáveis que afetam os parâmetros de decisão dos agentes estão no *nível macro* os autores entendem esta expressão tanto como fatores macroeconômicos (inflação, câmbio, preços nos mercados nacionais e globais, quanto nos níveis de política pública inclusive os aspectos institucionais que influenciam os parâmetros de decisão dos agentes.

A Figura 4 mostra uma visão esquemática dos modelos de desflorestamento. Num nível mais abrangente, chamado pelos autores de *nível macro*, estão as causas que os autores chamam de *causas subjacentes* do deflorestamento. Estas causas vão definir quatro aspectos que vão ter influência nos parâmetros de decisão dos agentes: Instituições, Infra-estrutura, Mercados e Tecnologia. Estes aspectos vão definir o *Ambiente* da tomada de decisão dos agentes. Isto vai ser o contexto onde estão inseridos os agentes e podem ser consideradas (na maioria das vezes) as *condições subsidiárias* dos modelos. Estes parâmetros são, como o próprio nome diz, estáticos, para a maioria dos modelos. Num nível micro-econômico (nível dos agentes) é que serão efetuadas as suposições sobre a racionalidade dos agentes. Um aspecto sobre este tipo de modelo é que não há uma maior discussão sobre como o comportamento dos agentes pode influenciar o ambiente da tomada de decisões (acrescentado como a seta cinza na Figura 4). Esta influência sobre o ambiente altera o contexto das decisões dos agentes e, portanto os seus parâmetros de decisão. Esta influência

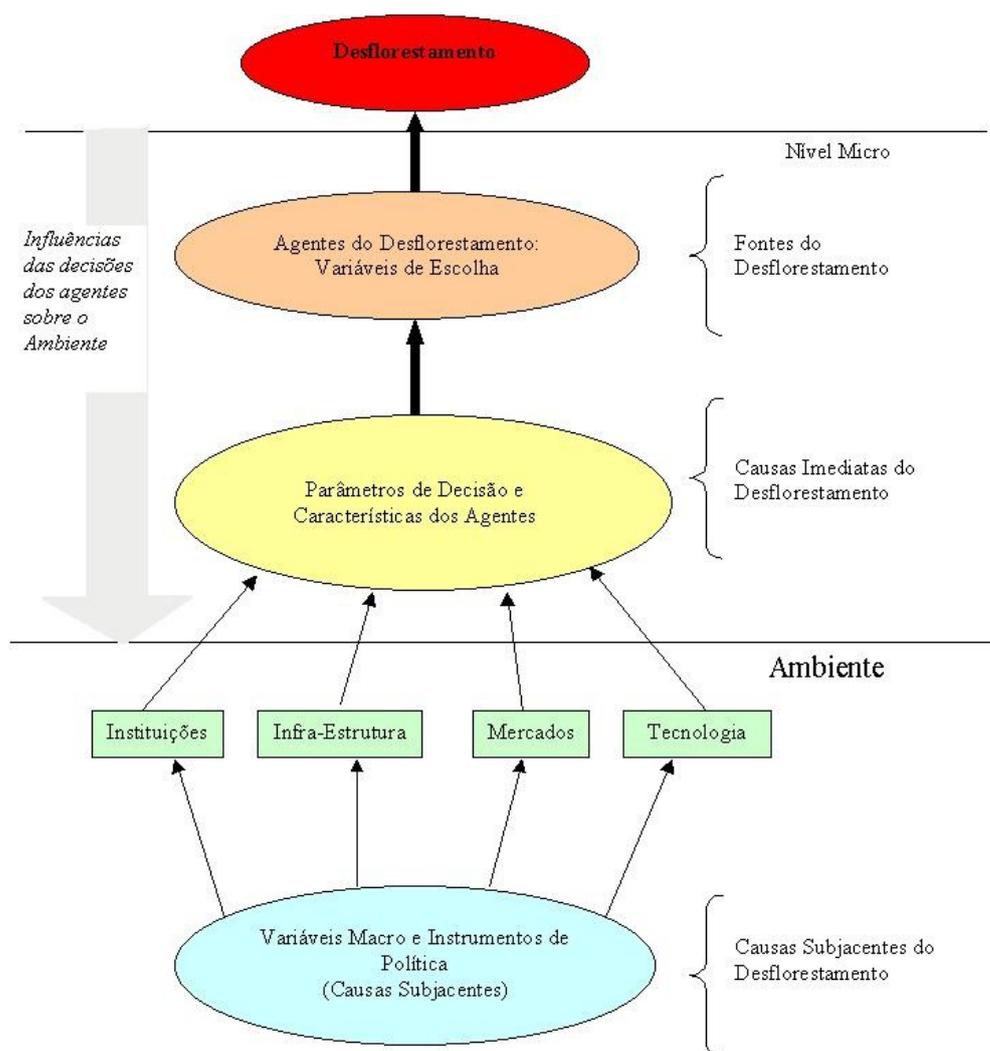


Figura 4: Causas Subjacentes, Imediatas e Fontes do Desflorestamento
 fonte: (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998, p.11) - modificado por este autor

recursiva é difícil de captar nas abordagens de modelagem resenhadas pelos autores.

Nos modelos de nível micro-econômico (ou como os autores chamam, modelos no nível das famílias e firmas) dois modelos têm destaque: Bulte e van Soest (BULTE; van SOEST, 1996) utilizam um modelo de otimização dinâmica para mostrar que os tempos de esgotamento do recurso madeireiro em florestas primárias e florestas exploradas vão depender das interações entre o crescimento dos custos marginais da exploração madeireira, e da taxas de crescimento das árvores em florestas exploradas. Os preços da madeira, a probabilidade de invasões de suas áreas de exploração (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998, p.17).

Outro trabalho resenhado pelos autores (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998, pp.17,20,34) é o de Walker e Smith (WALKER; SMITH, 1993) este trabalho, feito para a situação da Indonésia, analisa quando as madeireiras podem decidir quebrar os contratos de concessão que (impõem manejo sustentável e proteção contra invasões da floresta) e colher toda a madeira de algum valor econômico deixando as concessões imediatamente. Neste modelo, apesar dos preços da madeira, possibilidade de cancelamento de contratos pelo governo e detecção de violação de contratos de concessão serem estocásticos, os madeireiros conhecem as suas distribuições de probabilidade, podendo portanto calcular uma solução ótima para a decisão de qual o tempo ideal até uma quebra de contrato de concessão. Se o manejo sustentável gera lucros maiores ou iguais aos custos de oportunidade do capital (a possibilidade de outros investimentos) o governo (tendo uma uma probabilidade alta de detectar uma violação de contrato) pode usar inspeções aleatórias como forma de promover o manejo su-

tentável das concessões. Manter as concessões com práticas de manejo sustentável, porém, só é possível se o governo tem credibilidade (i.e. se as ameaças de cancelamento de concessões são efetivamente cumpridas e se as inspeções efetivamente detectam as quebras de contrato). De outro modo, os concessionários tendem a coletar no menor prazo possível toda a madeira economicamente viável (*liquidation harvesting*). Não há, para os autores, um relacionamento simples entre a probabilidade de existência de manejo sustentável nas concessões e o tamanho das concessões mas a probabilidade de manejo sustentável é menor se a taxa de desconto é maior. O governo pode promover o manejo sustentável diminuindo o prazo das concessões e cumprindo as ameaças de revogar as concessões nos casos de quebra de contrato.

Nos modelos de “nível-macro” Kaymovitz e Angelsen (KAIMOWITZ; ANGELSEN, 1998) mostram que os preços da madeira geralmente são considerados exógenos quando esta é exportada e o tamanho das exportações não é suficiente para afetar os preços internacionais. Os preços são considerados endógenos quando a madeira é vendida em mercados locais pequenos, os custos de transporte são altos ou o governo impõe restrições ao comércio de madeira. Em alguns modelos deste tipo quando a rentabilidade da atividade madeireira aumenta (devido a ganhos de produtividade, aumento de demanda, maior oferta de força de trabalho ou maiores oportunidades de mercados provocadas pela abertura econômica) há uma tendência à superexploração do recurso e à sua exaustão (BRANDER; TAYLOR, 1994; FINDLAY; LUNDAHL, 1994).

Os modelos de equilíbrio geral computável (CGE) resenhados pelos autores ge-

ralmente têm como conclusão que desvalorizações cambiais tendem a levar a aumentos no desflorestamento. Isto também ocorre para a madeira, especialmente se a exploração madeireira é mais orientada para exportações. No caso do Brasil, quanto maior se tornar a participação das exportações na produção de madeira explorada de florestas nativas, maiores serão os impactos de um câmbio depreciado em relação ao dólar. Isto é, desvalorizações cambiais tenderão a aumentar a atratividade da extração de madeira para exportação. Quanto mais o setor madeireiro aprender os canais de comercialização da madeira para o exterior, maior vai ser a pressão sobre o recurso se o câmbio estiver favorável para o setor exportador. A pressão sobre os estoques tende a aumentar mais ainda devido ao fato de que há uma potencial diminuição dos estoques de madeira tropical na Ásia e na África.

Geist e Lambin (GEIST; LAMBIN, 2002b, 2002a) dividem as causas do desflorestamento em causas subjacentes e causas próximas. Num estudo de 152 casos publicados na literatura os autores avaliam que o desflorestamento tropical é causado por um conjunto complexo de fatores. No nível subjacente, os fatores que levam ao desflorestamento são Econômicos (expansão de mercados, urbanização e industrialização, variações em custos e preços), Tecnológicos (intensificação agrícola, desperdício no setor madeireiro, funções de produção agrícolas), Demográficos (fertilidade, migração, mudanças na expectativa de vida), Políticos e Institucionais (crédito, políticas de desenvolvimento, corrupção, relações de propriedade da terra) e Culturais (públicos: valores, crenças; individuais: busca de renda, relação com a floresta, imitação). No nível de causas próximas tem-se: A expansão da infra-estrutura (transporte, assentamentos, mineração, energia), a expansão da agricultura (culturas

permanentes, culturas de larga escala, agricultura itinerante, expansão da pecuária, colonização), extração de madeira (comercial, carvão, combustível). Nos casos analisados da literatura na América Latina os autores não encontram nenhuma citação da atividade madeireira como fonte única do desmatamento. O que concluem os autores no trabalho é que as causas do desflorestamento são complexas e histórica e geograficamente localizadas isto implica que qualquer análise do desflorestamento deve levar em conta as especificidades locais e os processos históricos de desenvolvimento.

Um outro estudo recente sobre desflorestamento (MARGULIS, 2003) mostra que a pecuária é, atualmente, a principal atividade a contribuir para o desmatamento. A principal conclusão de Margulis é (MARGULIS, 2003, p. 14):

“... a pecuária de corte na Amazônia Oriental, ou na chamada fronteira consolidada, é altamente rentável do ponto de vista privado, apresentando taxas de retorno superiores às da pecuária nas regiões tradicionais do país. Dentre os fatores explicativos encontram-se, além da disponibilidade de terra barata, as condições geológicas particularmente favoráveis à pecuária, principalmente a pluviosidade, a temperatura e a umidade do ar que garantem a alta produtividade das pastagens. As taxas de retorno da pecuária estrita (i.e., excluindo a venda da madeira) são consistentemente acima dos 10%. Esses valores são potencialmente alcançados por pecuaristas estabelecidos e capitalizados na fronteira consolidada da Amazônia Oriental.”

Tabela 2: Pecuária - Receita Líquida por R\$ $ha^{-1}ano^{-1}$

Local	R\$ $ha^{-1}ano^{-1}$	TIR sem Terra (%)
Alta Floresta - MT	138,91	14,5
Ji-Paraná - RO	132,87	11,5
Paragominas - PA	95,39	11,0

2003, p.57)

Fonte: (MARGULIS,

A constatação que a pecuária é uma atividade rentável na Amazônia Oriental (e na região do chamado “arco do desflorestamento”) leva a uma percepção de que o processo de ocupação da região para criação de gado tende a manter o ritmo de expansão, se as condições continuarem favoráveis. Apesar do autor calcular os custos sociais (globais) gerados com o desmatamento em torno de US\$ $100ha^{-1}ano^{-1}$, que são acima dos ganhos da pecuária calculados no trabalho (US\$ $75ha^{-1}ano^{-1}$). O problema é novamente que a apropriação dos benefícios gerados pela pecuária é privada e as externalidades são globais. Estas externalidades não são percebidas no nível local nem mesmo no nível nacional. Embora a perda de um decantado “patrimônio genético das florestas” possa implicar em prejuízos para o país, a percepção corrente é que estes prejuízos, caso ocorram, serão globais e percebidos no longo prazo, enquanto os benefícios pela ampliação da produção de carne a partir do gado rentável da Amazônia se dão no lucro dos produtores, no PIB regional e no balanço comercial no curto prazo. Internalizar estas externalidades negativas diminui a competitividade da produção pecuária.

Os dados de Margulis (MARGULIS, 2003, pp. 57-58), resumidos na Tabela 2) demonstram que as receitas líquidas geradas pela produção pecuária nos painéis realizados na região variam de \approx R\$65,00 até \approx R\$ 139,00 $ha^{-1}ano^{-1}$.

Estes valores implicam no fato que a produção pecuária é uma atividade fortemente atraente com retornos econômicos razoáveis. Se isto for somado à percepção do risco pelos produtores, pode-se mostrar que a pecuária é ainda mais interessante visto que o gado é um ativo de liquidez muito maior que a maioria das culturas agrícolas. As taxas internas de retorno (TIR) calculadas pelo autor variam entre 9 e 11%. Comparando estes valores com os do manejo florestal madeireiro o autor (MARGULIS, 2003, p. 77) conclui que o valor presente líquido da pecuária é maior que o da atividade madeireira manejada (US\$ $203ha^{-1}ano^{-1}$ para manejo florestal sustentado contra US\$ $500ha^{-1}ano^{-1}$ para a pecuária) o que diminui bastante a atratividade do manejo florestal sustentado como investimento.

A atividade madeireira predatória, no entanto, pode ser uma alternativa de investimento no caso de um baixo controle sobre as regiões de fronteira. Madeireiros e pecuaristas podem usar o estoque de madeira existente como fonte de capital, extraíndo toda a madeira viável e convertendo a floresta em pasto. Outra alternativa também é a venda, pelo fazendeiro ou pequeno produtor de parte da madeira existente nas suas terras como forma de capitalização (que pode ou não estar associada a um plano de manejo).

Para o Brasil, então os modelos que usam a idéia de concessões talvez sejam menos adequados para representar a atividade madeireira do que modelos que a consideram mais uma atividade de “mineração”. Isto é, os madeireiros encaram o recurso florestal, não como um recurso renovável que deve ter seu processo de extração submetido a cálculos de longo prazo, mas como um recurso a explorar no

curto prazo devido a diversos fatores que produzem um ambiente de extrema incerteza para a atividade. Pode-se separar estes fatores em quatro aspectos principais:

1. *Biológicos* - A distribuição de indivíduos de espécies madeiráveis em bom estado dependem de fatores que estão fora do controle dos madeireiros. Para florestas manejadas, as árvores apresentam baixas taxas de crescimento, o que implica em menor rentabilidade por preço, por unidade de tempo. Além disso, o plantio de espécies nativas de alto valor depende criticamente de conhecimento sobre tratamentos culturais e controle de pragas que geralmente não está disponível, o que amplia a incerteza quanto à plantação de espécies nativas de madeira.
2. *Tecnológicos* - As técnicas de coleta em geral danificam uma parte significativa das árvores no entorno daquelas coletadas, o que prejudica a rentabilidade da atividade de exploração manejada. Mesmo técnicas de coleta planejada ainda apresentam um grau bastante alto de danos às árvores existentes. Além disso, o aproveitamento da madeira coletada é ainda muito baixo, de 50 a 70% (SILVA, 2001) o que implica em um nível baixo de rentabilidade por árvore coletada, visto que os custos da coleta continuam os mesmos.
3. *Econômicos* - As altas taxas de desconto do capital implicam em uma rentabilidade menor para o manejo, altas taxas de desconto tendem tornar a coleta predatória das árvores uma opção mais válida que o manejo sustentável, uma situação de retornos rápidos no curto prazo é favorecida ainda por uma volatilidade maior nos preços ou demanda da madeira nos mercados locais e

globais.

4. *Institucionais* - A baixa garantia dos direitos de propriedade ou de uso de áreas de coleta é um problema crítico para um investimento a longo prazo com manejo sustentável. No caso brasileiro, as sucessivas mudanças na legislação aumentam muito a incerteza associada à atividade madeireira. Os problemas de propriedade da terra (grilagem, documentação falsa) associados a baixos níveis de controle do Estado sobre as áreas de coleta e o também baixo controle sobre reservas (a maioria delas, áreas proibidas para a extração madeireira) possibilitam a ilegalidade. O que aumenta mais ainda a atratividade de formas de coleta predatória.

Então, os madeireiros, sejam proprietários de concessões, ou com controle dos planos de manejo, tendem a tirar toda madeira viável no menor prazo possível. As limitações deste processo são apenas a disponibilidade de capital (que limita o volume de produção por unidade de tempo) e a disponibilidade de áreas com recurso madeireiro em quantidade e distância viáveis.

No caso brasileiro, em vez de agricultura e pecuária (tanto a pequena quanto a grande produção) concorrerem com a atividade madeireira, a tendência é que as madeiras comprem a madeira de pequenos ou grandes produtores que, em troca, também recebem estradas e pontes nas suas áreas. Então, não há uma “competição” entre madeireiros e produtores rurais, mas uma complementaridade nas atividades. Esta complementaridade é acentuada pelo fato de que, se a atividade de coleta é predatória, ela pode ser feita antes da abertura de novas áreas para agricultura ou

pecuária, visto que não há nenhum motivo para manter a floresta como reserva de novas árvores para um corte futuro e, quanto maior o volume extraído, maior a renda auferida imediatamente pelo produtor agrícola que vendeu as suas árvores.

Esta simbiose entre a atividade madeireira predatória, a pecuária como uma alternativa de investimento rentável e a baixa capacidade de controle do Estado sobre as regiões de fronteira na Amazônia permite pensar que a dinâmica de expansão do desmatamento associa extração madeireira predatória, corte raso e expansão das pastagens.

3.3 Modelos Baseados em Agentes para Mudança do Uso do Solo na Amazônia

Os modelos baseados em agentes para mudança do uso do solo ainda não têm uma metodologia consolidada. Embora um conjunto de estudos exploratórios e de aplicações tenha crescido nos últimos anos (PARKER, 2003, p.16), estes estudos de simulação ainda têm muito a caminhar para sua aceitação mais generalizada como técnica para implementar modelos de tomada de decisão que tenham como consequência dinâmicas espaciais observáveis. A principal atração deste tipo de modelo é a sua capacidade de integrar, em um mesmo arcabouço, suposições sobre as funções de decisão dos agentes com suposições sobre processos de aprendizado e adaptação, integrando a “micro-escala” associada a estas suposições com a dinâmica agregada que é resultado da soma e interação dos comportamentos individuais e das condições subsidiárias ³. Neste sentido, estas técnicas são *caminhos* para a

³O que chama-se aqui de *Ambiente*

exploração da complexidade envolvida na modelagem dos processo de mudança de uso do solo quando a integração entre decisões individuais e dinâmicas agregadas está envolvida.

Muitos dos estudos envolvem a relação entre decisões de agentes e seu reflexo no espaço. Modelos explícitos deste tipo têm como foco a difusão dos processos de mudança no espaço. Um dos elementos teóricos mais utilizados para a modelagem deste tipo de processo são os autômatos celulares. O uso de autômatos celulares para a modelagem da dinâmica do uso do solo na Amazônia pode ser visto no trabalho de Britaldo Soares Filho (SOARES-FILHO, 1998) e em um estudo sobre a dinâmica de uso do solo na região da BR-163 (SOARES-FILHO, 2002). Neste segundo estudo Integrou-se os autômatos celulares com um modelo descritivo de cenários para a mudança do uso do solo. Este modelo foi baseado em funções que balancearam as diversas influências dos seguintes fatores: Demografia, Capital Social, Estrutura Produtiva, Dinâmica Agrícola e Economia. Estes fatores e as variáveis que os compõem foram levantados a partir de seminários realizados pelo IPAM⁴ na região da Cuiabá-Santarém no ano de 2001. Estes fatores aumentam ou diminuem a intensidade das mudanças no uso do solo. As funções de mudança do uso do solo foram calculadas a partir da dinâmica observada historicamente. Esta dinâmica permite a inferência de uma matriz de probabilidades de transição para cada célula do modelo que é posteriormente, alterada pelos fatores citados acima. Foram feitos dois cenários (*bussines as usual* e *governance*) para mudança de uso do solo onde os fatores têm maior ou menor influência. Esta influência é derivada

⁴Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

das informações levantadas nas entrevistas.

O uso de um modelo de autômatos celulares integrado com funções explícitas de decisão baseadas em agentes, porém, ainda não é um resultado desta ferramenta. Para a construção explícita desta abordagem é necessário um modelo de agentes que possa ser integrado às células e modificar as suas probabilidades de transição. Um problema que ainda precisa ser resolvido para isto é o papel das variáveis que determinam as *condições subsidiárias* do modelo no comportamento dos agentes.

Thomas Berger produziu um modelo que integra autômatos celulares e agentes para analisar processos de inovação e difusão tecnológica na agricultura chilena (BERGER, 2001). Sua escolha por um modelo multiagentes se deve aos seguintes fatores:

1. Um melhor tratamento dos dados disponíveis. Que são em pequena quantidade geralmente associados a pesquisas de campo com grupos pequenos de agentes.
2. A facilidade de introdução de restrições e características para “indivíduos-típicos” em um modelo no nível dos agentes, que permite analisar o impacto de diversos tipos de política pública no nível dos indivíduos.
3. A possibilidade de modelar processos de adaptação e aprendizado dos indivíduos em resposta a mudanças no contexto onde eles estão inseridos.
4. Capacidade de captar as interações entre os indivíduos. O que um modelo de programação linear, que pressuponha custos de transação zero, não consegue.
5. A incorporação o uso de recursos comuns como um componente endógeno para

a formação dos preços dos agentes.

6. Flexibilidade na análise e na construção dos cenários.

Estes são, de forma geral, os argumentos mais relevantes na construção de modelos multiagentes para sistemas sócio-econômicos. As características estruturais dos modelos multiagentes permitem produzir um mapeamento mais preciso das observações dos indivíduos pesquisados e, assim, simular diversas situações que produzam *insights* sobre o comportamento do sistema observado em vários contextos diferentes. A possibilidade de incorporar algoritmos adaptativos no modelo permite supor formas de racionalidade sub-ótimas que podem ser mais coerentes com os processos observados, que incorporam decisões imperfeitas e permitem a correção destas decisões a partir de mecanismos de realimentação integrados aos modelos (as funções de *fitness*). Estas decisões imperfeitas implicam em *custos* associados a elas que não podem ser desprezados no cálculo dos agentes em um ambiente com *informação incompleta* e que modelos de otimização baseados em programação linear dificilmente incorporam. Os autômatos celulares, no modelo, permitem espacializar os impactos das decisões dos agentes incorporando os efeitos de fronteira de cada célula sobre as outras principalmente em relação à mudanças no sistema de transporte e aos impactos do uso de recursos comuns.

O modelo de Berger simula as variações da renda, concentração de terra, padrões de uso do solo, difusão de inovações e benefícios líquidos de diversos cenários de política pública para uma área de 667km^2 no Chile. O sistema tem cerca de 5.400 agentes, cada um resolvendo um problema de otimização linear com uma matriz

de 120x240. Nas simulações são variadas diversas condições: preços de insumos, crédito, custos do trabalho, custos da água e da terra e os limiares para adoção de inovações. O autor coloca que os impactos diretos de políticas públicas são mais facilmente simulados (como total de crédito fornecido ou nível de impostos) por outro lado, os impactos indiretos (como o papel da extensão rural) são mais difíceis de captar. Uma das pistas tentadas pelo autor é a análise de sensibilidade do modelo a diferentes padrões ad-hoc de sensibilidade a políticas de extensão. A execução do modelo mostrou que os agentes tendem a adotar diferentes inovações com diversas velocidades. Muitas inovações tendem a se difundir rapidamente e a alcançar níveis altos de saturação e as diferenças de padrão comportamental ou de nível de comunicação entre os agentes não jogam um papel importante no processo de difusão. O modelo usado mostra um alto potencial para análise de política pública. Quando do aumento da competição gerado por uma possível adesão do Chile ao Mercosul o modelo demonstra que os impactos na renda dos produtores vão depender criticamente da velocidade com que estes adotarem inovações, sendo a maior perda de renda para os agricultores tradicionais. O uso do modelo possibilita captar os diferentes efeitos de políticas públicas quando um ambiente com agentes heterogêneos é considerado. Apesar do modelo não utilizar nenhum algoritmo adaptativo, processos adaptativos são simulados visto que os agentes, quando resolvem seus problemas de otimização, incorporam os efeitos agregados das suas decisões no mercado (preços, custos).

Outro estudo recente que utiliza agentes para problemas especificamente associados com extração de recursos florestais é o de Purnomo (PURNOMO, 2003). Purnomo estuda um caso de manejo florestal envolvendo uma companhia estatal de

extração madeireira (*Inhutani II Sub Unit Malinau*) na Indonésia e a comunidade local. As restrições estabelecidas nos planos de manejo da área não permitiam espaço suficiente para um manejo eficaz. O estudo de Purnomo objetivou encontrar cenários de uso sustentável da floresta que permitissem, de um lado, a definição de critérios de manejo sustentável pela próprias comunidades dentro de cada local onde viviam e um aumento da renda auferida pelo manejo nestes locais. O autor utiliza um abordagem baseada em sistemas multiagentes para contruir os diversos cenários utilizados para testar as hipóteses.

Para construir os critérios de manejo sustentável das comunidades o autor elaborou uma base de conhecimento a partir de uma pesquisa de campo. Nesta pesquisa, o autor comparou diversos critérios e indicadores para manejo sustentável da floresta com o conhecimento das comunidades. A partir desta comparação produziu um base de conhecimento implementada em PROLOG⁵. As eventuais contradições entre a base de conhecimento com critérios científicos e a base com conhecimento local são resolvidas por uma decisão do usuário da base. O *sistema especialista* gerado por este processo interativo é utilizado como guia para a construção de um sistema multiagentes⁶ que procura analisar diversos cenários possíveis de colaboração entre os agentes (Compania Madeireira, Comunidades, Governo Local, Governo Central e ONGs). O autor testa três cenários com as comunidades podendo fazer extração madeireira e pagando diferentes taxas para o governo local e para a companhia concessionária. Nestes cenários o autor verifica que modelos com combinação de

⁵PROLOG é uma linguagem declarativa

⁶Este sistema multiagentes foi implementado utilizando o CORMAS (CIRAD, 2001)

pagamentos, pelas comunidades, de taxas de 10% ao governo e à companhia concessionária da extração leva a uma maior área de floresta e uma melhor conservação do estoque de árvores. As áreas de cultivo de arroz, que potencialmente substituiriam a floresta diminuem. Uma das conclusões mais interessantes do trabalho é que a inclusão do conhecimento local nas práticas de manejo melhora significativamente os indicadores e critérios de sustentabilidade no processo de exploração. O uso de uma ferramenta multiagentes permite uma incorporação direta da base de conhecimento gerada na pesquisa de campo nas simulações.

Modelos multiagentes demonstram ser uma ferramenta potencialmente útil para a simulação de processos complexos, onde um grande número de agentes heterogêneos e interações que mudam dinamicamente estão envolvidos. O seu uso tem possibilitado o teste de alternativas de política pública. Trabalhos como o de Berger (BERGER, 2001) demonstram que é possível a integração de um modelo baseado em agentes com uma simulação espacial dinâmica. O trabalho de Purnomo (PURNOMO, 2003) permite ver que é possível a construção de cenários que incorporem o conhecimento de agentes na modelagem e simulação sem, necessariamente resolver modelos de otimização com técnicas de programação linear. É possível, então, incorporar num modelo de simulação multiagentes a dinâmica espacial das decisões destes agentes.

3.4 Modelos Econômicos e de Simulação para a Atividade Madeireira

Nesta seção se analisará alguns modelos econômicos sobre a atividade madeireira que serão úteis para a implementação da abordagem discutida nesta tese. Alguns dos modelos relevantes são de nível global, seu foco principal é estabelecer níveis globais de demanda e preços para madeira e manufaturados de madeira. Estes modelos não têm uso direto na implementação do modelo de comportamento dos agentes, mas podem servir como um balizador para futuros preços e demanda internacional da produção de madeira tropical e, conseqüentemente, da produção de madeira Amazônica que é exportada. No contexto internacional uma das possibilidades existentes é a diminuição ou eliminação parcial das tarifas de importação para uma série de produtos no bojo dos acordos do GATT⁷ e da atual OMC⁸. Zhu, Buongiorno e Brooks (ZHU; BUONGIORNO; BROOKS, 2001) produziram um grande estudo de simulação⁹ que projeta os preços e a demanda da madeira e manufaturados de madeira para 180 países para os anos de 1998 a 2010. O estudo mostra que as possíveis liberalizações de tarifas e acordos de comércio não terão influência significativa nos preços e demanda de madeira no mundo. Os preços e a demanda, segundo o modelo continuarão crescendo moderadamente. O modelo prevê um crescimento de 11,5% nas exportações de madeira serrada da América do Sul de 1997-2010, num cenário de acelerada liberalização de tarifas. Um outro estudo anterior mostra (TROMBORG; BUONGIORNO; SOLBERG, 2000) um crescimento lento da exportação de madeira

⁷General Agreement on Tariffs and Trade

⁸Organização Mundial de Comércio

⁹Chamado de *Global Forest Products Model - GFPM*

da América Latina até 2010.

Num estudo sobre o consumo de madeira no Brasil e a possibilidade de aumento do consumo de madeira oriunda de florestas certificadas Smeraldi e Veríssimo (SMERALDI; VERÍSSIMO, 1999, p.13) mostram que, em 1997, da madeira produzida na Amazônia brasileira, São Paulo consumiu 20% e 56% (Tabela 3) foi destinada ao mercado interno (inclusive São Paulo exclusive a Amazônia legal) e apenas 14% foi exportado. Parte significativa desta madeira é ilegal. O IBAMA estima que $\approx 80\%$ (MONTEIRO, 2004) da madeira do estado do Pará é extraída ilegalmente (seja por inexistência ou desrespeito a planos de manejo, seja de áreas onde a extração é proibida). Os dados citados pelo autor falam que dos 11,3 milhões de m^3 em tora, foram aprovados pelo IBAMA apenas 3 milhões de m^3 . O mercado local é muito pouco sensível à legalidade da origem da madeira. O que torna a prática de extração de madeira ilegal uma atividade em que a ilegalidade compensa, pois, caso o controle sobre o processo de extração e transporte das toras não seja efetivo, o mercado consumidor decidirá a aquisição da madeira sobre qualidade e preço, não importando qual foi o seu processo de extração.

Supondo, então, um contexto onde a demanda não diferencia os processos de extração, a variável crítica passa a ser a rentabilidade do próprio processo de extração da madeira. As decisões sobre manejo sustentável ou extração ilegal, feitas pelos madeireiros (no caso de um mercado competitivo indiferente à certificação ou ao manejo sustentável), dependerão fundamentalmente: do volume de madeira extraído por unidade de área; dos custos de extração, processamento e transporte e dos

Tabela 3: Destino das madeiras amazônicas, 1997

Regiões	Madeira em Tora ($10^6 m^3$)	Participação %
Amazônia Legal	2,7	9,7
Goiás e Distrito Federal	1,0	3,6
Mato Grosso do Sul	0,5	1,8
Nordeste(sem Maranhão)	4,0	14,4
São Paulo	5,6	20,1
Minas Gerais	2,6	9,4
Espirito Santo	0,4	1,4
Rio de Janeiro	1,8	6,5
Rio Grande do Sul	1,2	4,3
Santa Catarina	1,5	5,4
Paraná	2,5	9,0
Externo	4,0	14,4
Total	27,8	100,0

Fonte: IMAZON in:(SMERALDI; VERÍSSIMO, 1999, p.14)

riscos a que o madeireiro se submete no caso de decidir por uma estratégia de exploração ilegal. Um outro aspecto a influenciar a decisão do madeireiro seria o custo de oportunidade de investimentos na mesma área. Madeireiros não têm necessariamente de cumprir um papel único. Podem, como investidores, estabelecer um portfólio onde a madeira é apenas um componente possível deste conjunto de investimentos. Combinando as taxas de rentabilidade e risco o investidor pode diversificar os usos da terra. Uma outra alternativa, no caso de um baixo controle sobre a ilegalidade é os investidores extraírem a madeira rentável e capitalizarem-se para aproveitar as taxas de retorno de outros negócios (como gado ou grãos). Então, a comparação de diversos tipos de investimento pode fornecer algumas pistas sobre o comportamento dos madeireiros.

Um estudo que faz este tipo de comparação é o de (NIEUWENHUYSE, 2000). Os autores fazem um estudo utilizando programação linear para a opção entre florestas

manejadas, plantações de teca (*Tectona grandis*) e gmelina (*Gmelina arborea*) e o uso da terra para agricultura e gado de corte. A função objetivo do modelo maximiza a renda regional produzindo uma combinação das diversas opções de uso do solo. O estudo usa dados do norte da Costa Rica. Os autores constroem vários cenários simulando a mudança do uso do solo com diversas variações de preços da madeira, carne, trabalho com duas condições para o mercado de madeira: com a demanda ilimitada e preços da madeira exógenos e a demanda limitada ($1,5 \text{ milhões } m^3 \text{ ano}^{-1}$) e preços endógenos. As taxas de produção da floresta nativa manejada são estimadas entre $1,33 m^3 ha^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $1 m^3 ha^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os volumes de produção das florestas plantadas (especialmente os de teca) são menos sensíveis às variações no preço da carne. Mas, em condições de mercado restrito a pecuária se torna a alternativa mais viável nas simulações executadas pelos autores. A renda da exploração manejada de florestas naturais é de $US\$32,00 m^3$ e, para se tornar uma alternativa viável em relação ao gado e as outras alternativas de uso do solo, os preços precisam subir mais de 440%. Este estudo mostra que as opções de uso do solo, supondo que os produtores calculam suas rentabilidades esperadas, vão variar significativamente em função desta rentabilidade. E que manejo, no caso do local estudado, é a alternativa menos viável em relação a estes retornos.

Um outro trabalho relevante para o estudo das decisões dos agentes em relação a opções de política pública em concessões na Malásia é do de Boscolo e Vincent (BOSCOLO; VINCENT, 1998). Neste estudo os autores utilizam um modelo para o comportamento dos madeireiros baseado no cálculo do valor presente líquido (NPV) acoplado a um modelo matricial do crescimento da floresta para avaliar diversas

alternativas de restrições ao corte de árvores de floresta em relação às decisões econômicas dos produtores. O modelo de crescimento de floresta é desenvolvido pelos autores em estudos anteriores (BOSCOLO; BUONGIORNO; PANAYOTOU, 1997; BOSCOLO; BUONGIORNO, 1997), a equação do modelo que dá o número de árvores por classe de tamanho no tempo é:

$$\mathbf{y}_{t+1} = \mathbf{G}[\mathbf{y}_t - \mathbf{h}_t - (1 - 2/3\omega)\mathbf{D}\mathbf{h}_t] + \mathbf{c} \quad (3.1)$$

Onde \mathbf{y}_{t+1} é um vetor $1 \times mn$ indicando o número de árvores por grupo de espécie ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) e classe de diâmetro ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) vivas no tempo t ; $\mathbf{h}_t[h_{ijt}]$ é um vetor do mesmo tamanho $1 \times mn$ indicando o número de árvores coletadas no grupo i , classe de diâmetro j no tempo t ; \mathbf{G} é uma matriz $mn \times mn$ do crescimento e da mortalidade das árvores \mathbf{c} é um vetor $q \times mn$ do recrutamento \mathbf{D} é uma matriz $mn \times mn$ dos danos causados pela coleta e ω é um parâmetro para indicar se é manejo de impacto reduzido ou extração convencional.

O modelo é integrado às decisões e estratégias dos agentes através das variáveis \mathbf{h} e \mathbf{G} e do parâmetro ω . Estes números refletem o volume coletado pelos agentes e o impacto do processo de coleta na floresta, o que vai implicar em maior ou menor rentabilidade das coletas futuras. Os dados usados para calibrar o modelo da floresta foram tirados de diversos estudos feitos na Indonésia.

O modelo de decisão do agente usa a equação do Valor Presente Líquido (NPV) da extração florestal com e sem manejo de impacto reduzido (RIL)¹⁰, considerando

¹⁰Manejo de Impacto Reduzido (Reduced Impact Logging) é um conjunto de técnicas que permite diminuir a perturbação da floresta pela exploração madeireira. Estas técnicas reduzem, segundo

também as características da floresta determinadas pela equação 3.1. O NPV é calculado da seguinte forma:

$$NPV = \sum_{t=0}^t \sum_{i,j} [(P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL}] \delta_t \quad (3.2)$$

onde P_{ij} é o valor de mercado das toras de uma árvore da espécie i com classe de diâmetro j ; C_j é o custo variável de coletar e transportar uma árvore do ponto de coleta até uma serraria ou porto; F_c é o custo fixo da exploração madeireira convencional (US\$ 800,00ha⁻¹); F_{RIL} é o custo fixo adicional associado com a implementação do manejo de impacto reduzido (US\$ 135,00ha⁻¹); δ_t é o fator de desconto $\delta_t = 1/(1+r)^t$, e r é a taxa de desconto discreta. Esta taxa varia de 1 a 10%.

O madeireiro pode escolher adotar o RIL completamente ($\omega = 1$) ou parcialmente ($0 < \omega < 1$). O manejo de impacto reduzido, no modelo apresentado pelos autores, afeta apenas os custos fixos e o valor de desconto (ω) é o mesmo para todas as colheitas. P_{ij} , C_j , F_c e F_{RIL} são considerados constantes, para simplificar o modelo. É assumida uma colheita média de 50m³ha⁻¹.

O problema de otimização do agente é então:

$$\max NPV \quad (3.3)$$

$$h_t, \omega \quad (3.4)$$

a Fundação Floresta Tropical (<http://www.tropicalforestfoundation.org/ril.html>): os danos provocados por estradas de extração e por tratores em quase 50%; a abertura do dossel provocada pela extração; os custos totais em 10-15% e o desperdício de madeira em até 60%. As técnicas de RIL, porém, implicam em um aumento significativo do investimento de capital necessário à exploração e também necessitam de garantias para os direitos de uso do solo em prazos longos.

s.a.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}_{t+1} &= \mathbf{G}[\mathbf{y}_t - \mathbf{h}_t - (1 - 2/3\omega)\mathbf{D}\mathbf{h}_t] + \mathbf{c} \\
 \mathbf{h}_c, F_c, F_{RIL} &\begin{cases} = 0 & \text{if } t \neq k \times l \quad (k = 0, \dots, T/l) \\ \geq 0 & \text{if } t = k \times l \end{cases} \\
 &\mathbf{h}_t + (1 - 2/3\omega)\mathbf{D}\mathbf{h}_t \leq \mathbf{y}_t \\
 &\mathbf{y}_0 = \text{valor inicial} \\
 &\mathbf{y}_t, h_t \geq 0
 \end{aligned}$$

Isto é, o agente tenta maximizar o NPV escolhendo um volume madeira a coletar (que não pode ser maior que a quantidade disponível na floresta) e uma estratégia de coleta (um valor para ω). O madeireio pode escolher o RIL ($\omega = 1$) ou uma estratégia de coleta com manejo convencional ($\omega \approx 0$). O modelo é centrado então na decisão dos agentes sobre a agenda de colheitas (*harvest schedule*) Os autores estabelecem os ciclos de corte em 10, 20, 30 ou sessenta anos para dap 50-60cm.

Os lucros da colheita sequencial (π_0) são definidos como:

$$\pi_0 = \sum_{i,j} (P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL} \quad (3.5)$$

Representa o faturamento menos os custos totais. O Valor Presente Líquido é definido como:

$$NPV = \pi_0 \sum_{s=0}^S \delta \quad (3.6)$$

Onde s representa um ano.

A partir destas equações, os autores analisam vários cenários de taxas e critérios de desempenho que podem ser estabelecidos como políticas para as concessões. As opções de política pública são: Taxas por área ($\pi_0 = \sum_{ij}(P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL} - \tau$) que implicam numa taxa fixa pela área total ($\tau.US\$.ha^{-1}$); Uma cobrança royalties por árvore extraída ($\pi_0 = \sum_{ij}(P_{ij} - C_j - \tau)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL}$) onde esta taxa é baseada no volume extraído da floresta ($\tau.US\$.arvore^{-1}$); Uma taxa *ad-valorem* que implica em ($\pi_0 = \sum_{ij}(\tau P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL}$). Todas estas taxas tem como característica a redução dos lucros dos madeireiros. Uma outra abordagem testada pelos autores é a produção bônus de performance (PB) que implicam em um pagamento pela adoção do manejo de impacto reduzido. Estes bônus funcionariam de forma a diminuir o impacto financeiro da adoção de manejo de impacto reduzido na extração. Estes bônus podem ser modelados como: ($\pi_0 = \sum_{ij}(P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL} - (1 - \omega)PB$) ou como ($\pi_0 = \sum_{ij}(P_{ij} - C_j)h_{ijt} - F_c - \omega F_{RIL} - PB + \omega(PB - F_{RIL})$) estes bônus aumentariam a atratividade da aplicação em manejo de impacto reduzido. A partir daí são calculados vários cenários variando as taxas, bônus e taxas de desconto. Os autores resumem suas conclusões da seguinte maneira:

1. Concessões longas implicam em pouco incentivo para que os madeireiros adotem RIL. Isto se deve ao efeito das taxas de desconto;
2. Royalties podem ser usados para que os madeireiros respeitem limites de diâmetros das árvores, mas são pouco efetivos como instrumentos que afetem

a renda e desencorajam a adoção do RIL.

3. Bônus de performance precisam ser muito altos para encorajar a prática de adoção de valores mínimos de diâmetro de corte.
4. Condições de renovação de concessão baseadas em indicadores de performance são um forte incentivo à adoção de RIL e de parâmetros para diâmetros mínimos de corte. Mesmo quando as concessões são muito curtas (1-2 anos)
5. Condições renovação de concessões baseadas em indicadores de performance podem diminuir os valores dos bônus de performance necessários para que os madeireiros respeitem as regras, royalties baseados na área de concessão não têm este efeito.

Com a queda de custos de transporte e o aumento dos preços os madeireiros tendem a fazer ciclos de corte mais curtos. Se diâmetros mínimos de corte são estabelecidos, os madeireiros tendem explorar o máximo de madeira possível nos dois primeiros ciclos de corte. O modelo prevê que os madeireiros preferirão ciclos mais longos se puderem cortar o máximo de madeira possível no primeiro ciclo. Os madeireiros, então, tendem a cortar o máximo de árvores possível nos primeiros ciclos para parte significativa das condições estabelecidas no modelo.

Este modelo implica também que as condições de fiscalização e controle da atividade madeireira são ideais. Em condição de fraco controle, cortar o máximo de árvores possível no menor tempo parece ser a opção mais rentável para os madeireiros.

3.5 O Modelo de Steve Stone

O primeiro modelo de larga escala para simulação da exploração madeireira na Amazônia é de Steve Stone (STONE, 1997). O modelo de Stone procura, ao mesmo tempo, estimar volumes e dinâmica espacial da atividade madeireira nos pólos madeireiros no estado do Pará e produzir estudos de longo prazo sobre a dinâmica da indústria madeireira.

Stone (STONE, 1997, 1998a, 1998b) usa um modelo Von Thünen modificado que permite a mudança da superfície de fricção no tempo como um resultado das decisões de produção e investimento dos agentes.

As *células de oferta* ($X_i, i = 1, \dots, m$) representam áreas de floresta em um reticulado bi-dimensional onde os madeireiros (no caso de Stone, os pólos madeireiros) coletam a madeira.

As *células de demanda* ($Y_j, j = 1, \dots, n$) são pólos madeireiros. De fato, Y_j representa a capacidade de produção dos pólo madeireiro j em (US\$) para cada período.

Classes de Madeira ($L_k, k = 1, \dots, q$) representam as diferentes espécies de madeira extraídas da floresta (que no modelo de Stone é representada pelas células de floresta).

Estes valores variam no tempo ($t = 1, \dots, T$). O subscrito associado ao tempo é omitido no modelo. Cada equação é resolvida para um único período de tempo.

O valor da classe de madeira k na célula i , líquido dos custos extração ($c_1 = US\$/m^3_{tóra}$), transporte ($c_2 = US\$/m^3_{tóra}/km$), processamento ($c_3 = US\$/m^3_{serrado}$)

e taxas (τ) é denotado por:

$$\pi_{i,j,k} = X_{i,j,k} \{ \phi [p_{j,k} (1 - \tau) - c_3] - c_{1,k} - c_{2,i,j} \} \quad (3.7)$$

onde:

- $X_{i,j,k}$ é o volume de madeira coletável de classe k na célula i para o pólo madeireiro j ($m^3_{tóra}$);
- ϕ é o coeficiente de conversão de tora para madeira serrada. Representa o grau de eficiência da indústria madeireira ($m^3_{serrado}/m^3_{tóra} - 0 < \phi < 1$);
- $p_{j,k}$ é o preço da madeira processada de classe k no centro de demanda j ¹¹ ($US\$/m^3_{serrado}$);
- τ é o valor dos impostos ($US\$/m^3_{serrado}$, $0 \leq \tau \leq 1$);
- c_3 é o custo de processamento ($US\$/m^3_{serrado}$);
- $c_{1,k}$ são os custos de extração por classe de madeira incluindo o custo da madeira em pé pago ao produtor ($US\$/m^3_{tóra}$);
- $c_{2,i,j}$ o custo de transporte da célula i ao pólo madeireiro j ($US\$/m^3_{tóra}/km$)

Assume-se que as firmas na indústria madeireira maximizam lucros sujeitas a restrições de capital e capacidade produtiva. Os madeireiros tentam maximizar os

¹¹Aqui Stone atribui aos pólos madeireiros também a função de centros de demanda. Esta escolha simplifica o problema de otimização das madeireiras, mas, por outro lado exclui os custos de transporte dos pólos madeireiros aos centros demanda (SP, PR, Exterior, por exemplo) que podem alterar os resultados finais de rentabilidade da atividade madeireira

lucros a cada período ¹². Assim, a função objetivo para a indústria madeireira (para cada período de tempo) vai ser:

$$\max \Pi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^q X_{i,j,k} \{ \phi [p_{j,k} (1 - \tau) - c_3] - c_{1,k} - c_{2,i,j} \} \quad (3.8)$$

s.a.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q X_{i,j,k} &\leq \bar{Y}_{j,t} \\ \bar{Y}_{j,t} &= (1 - \gamma + \omega) \bar{Y}_{j,t} \end{aligned}$$

onde:

- γ é a taxa de depreciação do estoque de capital ¹³.
- ω é o crescimento na capacidade de produção. É um valor que vai depender da taxa de retorno da exploração madeireira:

$$\rho = \frac{\pi_{i,j,k}}{c_{1,k} + c_{2,i,j} + \phi c_3} \quad (3.9)$$

e vai variar entre $\tilde{\omega}(-0.26)$ e $\bar{\omega}(0.26)$. O último valor é a taxa média histórica de crescimento da atividade madeireira entre 1970 e 1990.

Stone propõe o investimento como uma função do estoque de capital anterior (\bar{Y}_t), a taxa de juros (δ) e a taxa de retorno da exploração madeireira (ρ). O investimento para cada pólo madeireiro i no tempo t será dado por:

¹²O modelo é formulado como uma série discreta de problemas de otimização estática.

¹³Este parâmetro foi estimado por Stone como o inverso da vida útil média do equipamento das madeiras (em torno de 20 anos por serra-fita).

$$\Delta Y_{t+1} = \iota(\bar{Y}_t, \delta, \rho) \quad (3.10)$$

A condição de entrada para a indústria é:

$$\frac{[\sum_i \sum_k X_{i,j,k} | \rho > (1 - \delta)] - \bar{Y}_{j,t}}{\bar{Y}_{j,t}} = \theta \quad (3.11)$$

Quando $\theta > 0$ as firmas considerarão aumentar o estoque de capital se a rentabilidade das áreas de exploração for maior que o custo de emprestar capital.

Para a condição de saída:

$$\frac{[\sum_i \sum_k X_{i,j,k} | \pi_{i,j,k} > 0] - \bar{Y}_{j,t}}{\bar{Y}_{j,t}} = \theta' \quad (3.12)$$

Quando $\theta' < 0$ isto implica que a madeira explorável de maneira lucrativa nas áreas alcançadas pelo pólo madeireiro j estão abaixo da capacidade de processamento do pólo. Este mecanismo fará com que as firmas saiam do negócio ou decidam relocar-se para outra área que seja lucrativa onde haja uma quantidade suficiente de madeira para explorar.

Com estas condições de entrada e saída Stone constrói a função da mudança do estoque de capital no pólo madeireiro:

$$\omega = \begin{cases} \bar{\omega} & \text{if } \bar{\omega} < \theta; \\ \theta & \text{if } 0 \leq \theta < \bar{\omega}; \\ 0 & \text{if } \theta < 0 \wedge 0 < \theta'; \\ \theta' & \text{if } \tilde{\omega} < \theta' \leq 0; \\ \tilde{\omega} & \text{if } \theta' < \tilde{\omega}. \end{cases} \quad (3.13)$$

Com este modelo, Stone faz uma simulação espacial baseada em um sistema de informações geográficas (SIG). Mas, para isto há ainda as seguintes suposições simplificadoras:

- A extração das toras é *binária*, isto é: a cada instante do tempo toda madeira de uma classe k é extraída de uma célula j .
- Toda a madeira é extraída por serrarias. Esta suposição é baseada no fato de sua pesquisa ter mostrado que 87% das empresas madeireiras serem serrarias que são responsáveis por 70% do volume de produção ¹⁴.
- Cada Região pertence a apenas um pólo madeireiro.

Stone fez então um conjunto de simulações para a indústria madeireira no Pará. Projeta (STONE, 1998b) um consumo inicial de madeira em tora de $21.250.000m^3ano^{-1}$ para 1.700 madeireiras no Pará. Stone constrói três cenários de crescimento dos preços da madeira. Um cenário de crescimento baixo dos preços ($1\%ano^{-1}$), um cenário de crescimento moderado ($3\%ano^{-1}$) e um cenário de crescimento alto ($5\%ano^{-1}$). Usa três classes de preço para a madeira: uma classe de baixo preço ($US\$100 - 175/m^3$), uma classe de médio preço $US\$175 - 300/m^3$) e uma classe de

¹⁴Uma consequência desta simplificação é que o modelo deixa de capturar qualquer efeito estrutural (como retornos em escala, por exemplo) na simulação.

alto preço ($US\$600 - 700/m^3$). Usando o modelo apresentado acima e um sistema de informações geográficas (SIG), Stone projeta a produção madeireira do Pará de 1995 até 2005. Os cenários estimam uma coleta anual entre ≈ 30 e 45 milhões de m^3 de madeira em tora por ano. O crescimento da capacidade produtiva da indústria varia, no período de 10 anos, entre 8% (cenário com 3% de crescimento preços e restrições governamentais à extração) e 19% (cenário com 5% de crescimento de preços sem restrições governamentais). A área onde a extração de madeiras é mais intensa varia de 69 milhões de hectares (cenário sem restrições e 3% de crescimento nos preços) até 70 milhões de hectares (cenário com restrições baseadas em Parques e 3% de crescimentos nos preços).

Stone analisa (STONE, 1998b) dois tipos de política pública que ele chama de *políticas de promoção do crescimento* e *políticas de restrição do crescimento*. O cenário de maior expansão da área de extração acontece com o asfaltamento BR-163 (em torno de 25% acima do cenário base). Nas políticas restritivas de crescimento são analisados dois cenários. O primeiro é um de aumento da fiscalização dos parques e reservas e o outro é de aumento das regulações ambientais para promover o manejo sustentável. No cenário de aumento da fiscalização, não há alteração do ritmo de expansão da atividade madeireira, o impacto é apenas na mudança das áreas onde a extração ocorre. Para o autor, os cenários demonstram que um aumento na área de parques pode promover a conservação (na área dos parques) sem a diminuição da renda da indústria. No segundo cenário há um aumento das restrições sobre a função de produção dos madeireiros no sentido de aumentar promover o manejo. As simulações consideram um aumento de $US\$5/m^3$ nos custos de extração. Este

aumento implica em uma diminuição significativa da área explorada, mas, tem como efeito colateral o aumento da extração da madeira de alto valor.

3.6 Políticas Públicas e a Mudança do Uso do Solo na Amazônia: O Papel da Modelagem e Simulação

Artigos revisados na literatura têm demonstrado que a atividade madeireira é um componente fundamental na discussão sobre mudanças no uso do solo na Amazônia.

A maioria dos modelos em que aparece a atividade madeireira na Amazônia tem como foco principal o desmatamento. O desmatamento, como se disse acima, é a principal fonte de preocupação da discussão sobre política pública para a Amazônia. A questão de como a ocupação econômica da região influencia as taxas de desmatamento e de como estas taxas podem variar de acordo com fatores como população, crescimento econômico, pecuária, produção agrícola de larga escala tem sido o objeto da maioria dos estudos resenhados aqui. A atividade madeireira aparece, muitas vezes, como uma atividade que acompanha o processo de ocupação, migrando para novas áreas de colonização onde há grande quantidade de matéria-prima disponível. Outras vezes, a própria atividade madeireira aparece como ponto de partida para os processos de ocupação econômica da região, instrumento de capitalização dos proprietários para viabilizar novos investimentos (em gado, agricultura de larga escala).

Estas diferenças não são, necessariamente, uma conseqüência de equívocos dos modelos, mas sim um reflexo da complexidade e da diversidade de padrões de organização e de acesso à matéria-prima que eventualmente podem surgir na indústria

e também um reflexo da complexidade existente nas regiões de ocupação recente. Nestas regiões a propriedade da terra, muitas vezes é incerta e os limites das propriedades, difusos.

Comunidades que ocupavam a terra secularmente (como índios e caboclos), nas regiões de fronteira, disputam espaço com colonos e fazendeiros. A terra (e os recursos disponíveis nela) passa a ser fonte de acumulação de capital e as relações entre os agentes são construídas e desconstruídas rapidamente. Neste espaço impreciso da fronteira, o surgimento de normas de conduta aceitas pela comunidade local é um processo que necessita de tempo. Os papéis, numa região de ocupação recente, mudam rápido, os agentes não têm tempo de construir normas de reciprocidade (que punam os *free-riders*, por exemplo). Por outro lado, o acesso a um recurso valioso que, devido à sua superexploração fica rapidamente escasso (como a madeira), permite a acumulação de capital nas mãos daqueles que a processam e comercializam, dando-lhes algum poder político e econômico nas comunidades em que eles estão inseridos. Madeireiros que têm acesso ao mercado em outros estados conseguem acumular rapidamente, podem ampliar seu capital transferindo os valores acumulados para outras atividades (como a pecuária ou a agricultura de larga escala) comprando terras. O ciclo de acumulação se encerra com o esgotamento do recurso. Os madeireiros que conseguem acessar novas fontes de matéria-prima e modificar os padrões de exploração e eficiência das indústrias para manter a rentabilidade com espécies de menor valor no mercado ou que conseguem ampliar os estoques florestas com madeiras nobres mantêm-se na região, outros, migram para novas áreas ou trocam de atividade.

Os modelos da atividade madeireira dificilmente captam esta dinâmica de longo prazo. Isto não é um problema dos modelos em si. Mas um problema das características estruturais das abordagens formais de modelagem. Os requisitos de ergodicidade da maioria dos modelos (principalmente os econômicos) (DAVIDSON, 1991) impõem restrições que impedem a elaboração de uma percepção consistente da *incerteza forte* existente nas decisões cruciais (SHACKLE, 1955b) como as decisões de investimento na atividade madeireira.

Outro elemento importante é que o processo de expansão da atividade madeireira na Pan-Amazônia não se encerrou. Recentes desenvolvimentos, como a pavimentação da rodovia ligando Rio Branco a Assis Brasil, no estado do Acre, a recente mudança da legislação florestal do Peru e a distribuição de novas concessões de madeira na Bolívia permitem inferir que a atividade madeireira está em expansão na Amazônia. Isto torna mais crucial a discussão do papel das políticas públicas e qual sua influência nas estratégias de exploração dos madeireiros. Diferentes estratégias de exploração escolhidas pelos madeireiros vão ter diferentes impactos ecológicos nas áreas onde a atividade está se expandindo.

As políticas de preservação (usualmente de responsabilidade do Estado) são mais vistas como uma concessão a pressões externas (nem sempre consideradas legítimas) do que uma atitude responsável dos governos em aumentar o valor do *capital natural* no longo prazo. Em situações de incerteza, um ganho de longo prazo, eventualmente baseado numa possível valorização do capital, que dependa de fatores políticos internos e externos, pode não ser preferível à opção de transformação imediata deste

capital disponível na floresta em lucro para um investimento de retorno a prazo mais curto. Os valores presentes líquidos dos investimentos não são os únicos elementos a discutir quando da decisão de investimento do setor florestal. A opção de ganhos imediatos mais altos em detrimento a um retorno futuro acumulado maior (o caso do NPV) pode ser racional em face da incerteza associada à decisão. O cultivo de soja ou a pecuária extensiva são investimentos com este tipo de característica (principalmente se os ganhos de curto prazo são aumentados por variações cambiais e mudanças conjunturais para cima nos preços de venda). Os agentes podem então preferir ganhos de curto prazo mesmo se os seus NPV's sejam menores do que para a exploração de madeira manejada. O esforço de parte das madeireiras em estabelecer garantias de longo prazo para os direitos de propriedade (ou de uso) das áreas de exploração está associado ao interesse da diminuição da incerteza no negócio. O problema aqui é que a opção de extração de um volume significativo de madeira no curto prazo, capitalizando os agentes para investimentos mais seguros, mesmo que de menor rentabilidade, pode ser mais atraente para boa parte dos produtores. Isto se dá porque, juntamente com uma estrutura mais rigorosa para a garantia dos direitos de uso (ou de propriedade) da floresta, vem, provavelmente uma exclusão de parte dos madeireiros, notadamente aqueles menos capitalizados e com menor capacidade de investimento. Um mecanismo de venda de concessões pode ter este sentido. Por outro lado, a inclusão de pequenos madeireiros no processo com concessões pequenas, ou concessões baseadas em consórcios, pode dificultar o controle da extração, não apresentando significativas vantagens em relação ao atual sistema de planos de manejo.

Avaliar o impacto de diferentes alternativas de políticas públicas tem sido um dos principais usos dos modelos de simulação da atividade madeireira. Um aspecto importante nestes modelos é o uso de suposições sobre o comportamento dos agentes, tendo em vista diversos cenários de regulação possíveis. O modelo de Boscolo e Vincent (BOSCOLO; VINCENT, 1998) é um avanço neste sentido, pois ele capta as decisões dos agentes em relação às estratégias de coleta associadas a diversos tipos de políticas para a promoção do manejo sustentável. É necessário também, considerar o custo de oportunidade de outros investimentos em relação à atividade madeireira. Neste sentido, estudos que comparam as rentabilidades da atividade madeireira com outras atividades (e com diversas modalidades de exploração madeireira) podem ser importantes para avaliar um futuro desmatamento provocado pelas escolhas dos agentes. Assim, estudos que comparam a atividade madeireira manejada com a atividade predatória, com plantações de madeira, com gado ou com culturas agrícolas, permitem inferir se a atividade madeireira é uma opção viável de investimento em relação aos custos de oportunidade de outros investimentos (como gado, por exemplo) que implicam em uma maior perturbação da cobertura vegetal da região (NIEUWENHUYSE, 2000; MARGULIS, 2003).

Estudos de simulação específicos, calibrados com dados da região, podem fornecer *insights* para a elaboração de políticas públicas. A simulação joga, neste tipo de abordagem o papel de um “instrumento do pensamento” (AXELROD, 1997a) na análise de cenários alternativos de regulação, permitindo a avaliação de possíveis impactos de políticas públicas na manutenção da sustentabilidade do uso dos recursos naturais da Amazônia. Estes modelos, porém, precisam manter a coerência

entre as suposições baseadas no comportamento dos agentes e os diversos *ambientes regulatórios* possíveis. A solução usualmente tentada pelos autores é a construção de modelos de otimização discreta onde um *agente típico* maximiza alguma função de resultado. Os modelos baseados neste tipo de abordagem precisam ter em conta o fato de que as decisões dos agentes se dão num contexto de incerteza forte (conhecimento incompleto) e de incapacidade dos agentes de avaliar todas as estratégias possíveis (racionalidade limitada). Os modelos baseados em agentes que consideram este tipo de restrição (como (PURNOMO, 2003)), são uma alternativa para incorporar uma maior complexidade na análise sem, no entanto, ampliar incontrolavelmente a complexidade dos modelos. Modelos baseados em agentes podem ser usados para construção de cenários que combinem o ambiente regulatório e suposições mais fracas sobre a sua racionalidade ou acesso à informação de forma a construir cenários de mudança no uso do solo que permitam orientar estudos de diversas alternativas de políticas públicas que considerem com uma maior precisão os agentes afetados por estas políticas.

4 *O Modelo Baseado em Agentes Adaptativos Artificiais: Formulação e Implementação para o Problema da Exploração Madeira*

Neste capítulo apresenta-se o modelo de simulação multiagentes. Inicialmente se apresenta o modelo matemático em que a implementação computacional está baseada, após isso é apresentada a implementação do modelo de simulação no `Sim(2ECO)`.

4.1 **Estratégias e Aprendizado**

Estratégia é o elemento fundamental a ser utilizado para a modelagem dos agentes. A noção de estratégia, (capítulo 1) é utilizada aqui para a implementação das simulações. A suposição aqui é que os agentes não têm um conhecimento completo das variáveis relevantes para a decisão. Neste contexto de *racionalidade fraca*, a abordagem de modelagem escolhida permite incorporar os processos de aprendizado do agente na execução das simulações. O foco é que, com informação incompleta e

racionalidade limitada, os agentes escolhem as estratégias de ação tendo em vista a informação disponível e a sua capacidade para avaliar qual, dentre os cursos de ação possível, é o que permite os maiores ganhos (ou ganhos *satisfatórios* na acepção de Simon).

Para que o agente possa avaliar do melhor curso de ação possível é necessária a implementação de algum tipo de função de otimização. Neste trabalho se experimenta algumas modalidades de funções de otimização a partir do trabalho de Steve Stone (STONE, 1997) e do trabalho de Boscolo e Vincent (BOSCOLO; VINCENT, 1998). O trabalho de Stone é a base para a implementação da função de otimização utilizada pelos agentes. Esta função foi modificada para incorporar dois aspectos: os custos de capital associados a estratégias de manejo sustentável e o papel do Estado na fiscalização e punição de estratégias de extração ilegais.

As principais diferenças entre o modelo desenvolvido nesta tese e os modelos de Stone e o de Boscolo e Vincent são:

1. Há muitos agentes concorrendo pelo recurso. Todos os dois modelos supõem a existência de apenas um agente representativo que toma a decisão sobre quanto, como e onde o recurso será explorado. No modelo implementado nesta tese, há muitos agentes em cada centro produtor (*pólo madeireiro*). Isto implica que há uma concorrência pelo uso do recurso e os agentes têm as suas estratégias determinadas também pela interação com os outros agentes.
2. Não é possível encontrar uma solução única para o sistema. Como há muitos agentes interagindo com conhecimento incompleto, isto implica que cada

agente vai encontrar uma solução para o seu problema de otimização que provavelmente corresponde a um ótimo local. Ótimos globais podem ser encontrados pelos agentes, mas, isto não é um objetivo do modelo. O objetivo é simular a dinâmica dos processo de interação dos agentes entre si.

3. O comportamento dos agentes (i.e. as *estratégias* escolhidas por eles) muda no tempo. Isto é resultado do processo de aprendizado. Cada agente tem um conjunto de estratégias que ele tenta aplicar dado um contexto de competição pelos recursos disponíveis. O processo de aprendizado dos agentes é simulado utilizando-se um *algoritmo genético*.

Os agentes podem escolher duas estratégias de coleta e três classes de árvore. A primeira estratégia de coleta (chamada aqui de *estratégia sustentável* referenciada como s_1) é a escolha de um padrão de exploração com manejo e RIL. A segunda estratégia de coleta (chamada de *estratégia predatória* e referenciada com s_2) é um padrão de exploração com o agente retirando toda a madeira disponível que for economicamente viável no menor espaço de tempo possível. Os agentes podem escolher uma entre estas duas estratégias de coleta (estratégia pura) ou uma combinação das duas estratégias (estratégia mista). Uma estratégia completa implica também numa escolha de um volume de madeira a coletar. No modelo implementado neste trabalho se escolhe entre três classes de madeira (alto valor - k_1 , médio valor - k_2 e baixo valor - k_3). A estratégia completa é, então, uma combinação de duas estratégias de coleta para três classes de madeira. O agente então pode combinar seis possibilidades com um volume qualquer de metros cúbicos de madeira em tora para

cada uma das possibilidades.

O modelo multiagentes é implementado utilizando o arcabouço de simulação desenvolvido para esta tese - *Sim(2ECO)*.

4.2 O Modelo Baseado em Agentes

O modelo de Stone não considera a influência das diferenças entre os custos de capital associadas às práticas de manejo sustentável com impacto reduzido (RIL) nas condições de entrada e saída para a indústria. O modelo também não considera os custos associados à fiscalização para as madeireiras (taxas, multas, apreensões) e não faz nenhuma diferença entre madeireiras pequenas e grandes. A inclusão destes fatores no modelo pode ser útil para compreender melhor a dinâmica espacial da atividade e a evolução da indústria na região.

A inclusão das madeireiras individualmente, como principais unidades da simulação, é fundamental para compreender o impacto dos tamanhos das madeireiras nos preços e nos diferentes padrões de exploração (exploração sustentável, exploração predatória). Para tornar esta abordagem possível é necessário reconstruir a função-objetivo (equação 3.8) dos agentes incluindo os custos de capital, fiscalização e ilegalidade. As condições de entrada e saída (equações 3.11 e 3.12) também devem ser reconstruídas para considerar os impactos dos tipos de madeireiras e dos padrões de exploração. Os agentes tentam maximizar os resultados da exploração madeireira e minimizar os custos associados com a extração ilegal. A função objetivo do agente, então é construída considerando agora os aspectos associados aos custos de

capital para diferentes estratégias de exploração e os custos associados à fiscalização e ilegalidade.

4.2.1 O Problema de Decisão dos Agentes

Os agentes devem decidir sobre qual o padrão de exploração e o nível de ilegalidade que lhes possam maximizar a renda esperada e minimizar os custos associados à ilegalidade. A função objetivo agora será uma função de rentabilidade esperada.

Agora a função objetivo estará então associada a um agente (uma madeireira) e não mais um pólo madeireiro.

4.2.1.1 Rentabilidade Esperada e Lucro Esperado

A função de rentabilidade esperada para um agente j será:

$$u_j^e = f(\text{Lucros Esperados}, \text{Custo Esperado da Ilegalidade}) \quad (4.1)$$

Lucros esperados para o agente j (Π_j^e) serão uma função dos custos totais esperados ($c_1, c_{2,j}, c_3, c_4$) e das vendas totais.

Fazemos a suposição simplificadora que os agentes vendem toda a produção, então, as vendas totais serão iguais à produção total vezes os preços de venda. Os custos dependerão da estratégia de exploração (s) escolhida pelo agente e vão também variar de acordo com as distâncias e o tipo de estrada para coleta. Incluindo na equação dos lucros os custos de capital e as estratégias de exploração temos para uma madeireira j as vendas totais esperadas serão:

$$p_j^e = \sum_i^{o_j} \sum_k^q \sum_s^a X_{i,j,k,s} \{ \phi_s [p_{j,k,s} (1 - \tau)] \}. \quad (4.2)$$

Esta equação vai representar, para uma célula i qualquer o grau de “atratividade” desta célula para uma dada estratégia de exploração.

A equação dos lucros totais esperados vai ter a seguinte forma:

$$\Pi_j^e = \sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^a X_{i,j,k,s} \{ \phi_s [p_{j,k,s} (1 - \tau) - c_{3,s}] - c_{1,k,s} - c_{2,i,j,s} - c_{4,i,j,s} \} \quad (4.3)$$

Onde $c_{4,i,j,s}$ e o custo de investimento por período de tempo (t) associado com a estratégia de exploração escolhida pela madeireira. A implementação de cada estratégia de exploração embute custos de aquisição ou aluguel de áreas de florestas e custos associados com elaboração e implementação de planos de manejo (para estratégias sustentáveis e atender a demandas da legislação). Isto implica que os custos de implementar uma estratégia sustentável serão mais altos. Estes custos funcionarão como uma barreira à entrada para os agentes e irão impor a necessidade de mais capital inicial e rentabilidade quando uma estratégia sustentável for escolhida. A taxa de retorno esperada da exploração para a madeireira j , incluindo os custos de capital e as estratégias será então:

$$\rho_j^e = \frac{\Pi_j^e}{\sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^a X_{i,j,k,s} (c_{1,k,s} + c_{2,i,j,s} + \phi_s c_{3,s} + c_{4,i,j,s})} \quad (4.4)$$

Se os custos de capital forem menores (*ceteris paribus*) para uma estratégia predatória (s_2), as taxas de retorno serão maiores.

4.2.1.2 Estratégias, Riscos da Ilegalidade e Governança

Os riscos que associados à atividade ilegal e ao grau de controle do estado sobre a atividade madeireira (λ_j) são calculados supondo que os agentes têm a probabilidade de apreensão de parte da madeira explorada ilegalmente. Estes valores representam um percentual da produção de madeira em tora dos agentes para cada período de coleta em relação ao volume total de produção.

$$\lambda_j^e = l(\text{Custo Esperado da Ilegalidade}) \quad (4.5)$$

Estes riscos vão depender do tipo de estratégia de exploração escolhida.

Assumimos aqui que o agente pode estabelecer qualquer combinação contínua entre dois tipos de estratégia pura. A primeira estratégia (s_1) seria ater-se às normas legais de Manejo Florestal sustentável (*estratégia sustentável*) e a segunda estratégia (s_2) seria a extração ilegal (*estratégia predatória*), onde o agente extrairia as toras sem autorização do IBAMA fora dos limites estabelecidos nos seus planos de manejo. Parte da madeira em tora explorada pode ser extraída utilizando a *estratégia sustentável* e outra parte utilizando *estratégia predatória*. O Agente pode então escolher *estratégias mistas* que combinem percentuais de madeira extraídos nas duas estratégias.

A *estratégia predatória* será mais ou menos lucrativa de acordo com a probabilidade o agente ter sua madeira capturada e as multas e punições aplicadas e executadas. É importante deixar claro que a execução das multas não é automática

e pode sofrer contestação legal. Neste sentido, o custo financeiro das multas deve ser descontado pelo tempo médio necessário para a sua execução (LIMA, 2003). O madeireiro pode, então, ter uma taxa de lucro suficiente para compensar o custo do capital mais o custo financeiro da execução das multas. A atividade ilegal (ou uma estratégia mista que tenha parte da madeira extraída ilegalmente) pode ser compensadora se a probabilidade de ter a madeira apreendida e as multas executadas não for suficiente para suplantarmos os ganhos associados com a ilegalidade.

Chamamos a esta probabilidade de apreensão da madeira ilegal de *grau de governança* (g). Este grau de governança é um valor associado a cada célula (i). Quando um agente executa uma extração ilegal (estratégia s_2), ele tem uma probabilidade g de ver a sua produção apreendida. Os custos da apreensão por período de tempo são então os custos de produção mais os custos de extração associados ao total da madeira extraída com estratégia s_2 . Os custos da escolha da estratégia predatória (CT_{s_2}) serão os custos totais da extração ilegal vezes a probabilidade de apreensão da madeira (g).

$$g \left[\sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q X_{i,j,k,s_2} (c_{1,k,s_2} + c_{2,i,j,s_2} + c_{4,i,j,s_2}) \right] \quad (4.6)$$

Associados a estes custos teremos ainda os custos das multas aplicadas descontadas do tempo médio necessário para a execução das multas (tx). A função de *Custo esperado da Ilegalidade* para uma madeireira j será então:

$$\lambda_j^e = g \left[\sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q X_{i,j,k,s_2} (c_{1,k,s_2} + c_{2,i,j,s_2} + c_{4,i,j,s_2}) \right] + \frac{multa}{(1 + \rho_j^e)^{tx}} \quad (4.7)$$

onde:

$$g = \{0 < g < 1 | \text{estrategia} = s_2\};$$

ρ_j^e é a taxa de retorno esperada;

$$tx > 0.$$

Estes custos diminuem a rentabilidade esperada da atividade ilegal. Sendo alta a probabilidade de apreensão da madeira extraída ilegalmente, diminuirá a atratividade da estratégia predatória. Se as multas forem altas e executadas imediatamente, a atratividade da estratégia predatória também diminuirá. Se a quantidade de madeira extraída ilegalmente for pequena, as multas pequenas e a sua execução demorar muito a acontecer, os agentes poderão considerar viável uma estratégia predatória.

4.2.1.3 O Problema de Decisão do Agente ($\max u_j^e$).

A função de *rentabilidade esperada* do agente j será então:

$$u_j^e = \Pi_j^e - \lambda_j^e \quad (4.8)$$

Então, o problema de otimização do agente j será ¹:

¹Barreto et al (1998), dizem que a área necessária para manter uma extração sustentável de madeira para uma madeireira de tamanho médio é de 7,500ha (250ha/ano \times 20anos).

$$\max u_j^e \quad (4.9)$$

s.a.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^a X_{i,k,s} &\leq \bar{Y}_{j,t} \\ \bar{Y}_{j,t+1} &= (1 - \gamma + \omega)\bar{Y}_{j,t} \end{aligned}$$

4.2.1.4 Condições de Entrada e Saída

A condição de entrada para uma madeireira j será:

$$\frac{[\sum_i \sum_k \sum_s X_{i,k,s} | \frac{u_j^e}{c_{1,k,s} + c_{2,i,j,s} + \phi_s c_{3,s} + c_{4,s}} > (1 - \delta)] - \bar{Y}_{j,t}}{\bar{Y}_{j,t}} = \theta_j \quad (4.10)$$

A decisão de acrescentar mais capital vai então depender do nível de rentabilidade esperada da exploração para a madeireira j (u_j^e)². Este nível de rentabilidade deverá ser maior que a taxa de juros para o capital praticada pelo mercado (δ). Quando isto acontece, as madeireiras ampliam o capital. Os custos de capital (c_4) são diferenciados de acordo com o tipo de estratégia escolhida pela madeireira. Estratégias predatórias (s_2) têm custos de capital inferiores aos de estratégias sustentáveis (s_1). Resultados da literatura (BARRETO, 1998; BOLTZ, 2001) apontam que os custos de exploração ($c_{2,s}$) são menores quando técnicas de coleta de impacto

² u_j^e vai combinar os lucros diretos esperados da exploração (π_j^e); e do custo esperado da ilegalidade (λ_j^e).

reduzido e maior nível de planejamento da exploração são aplicados nas madeireiras. Este padrão de exploração e processamento está normalmente associado com estratégias sustentáveis. Não há, porém, impedimento algum para que as madeireiras que optam por uma estratégia de exploração predatória adotem técnicas de manejo de impacto reduzido no processo de exploração. Um grau de governança mais alto vai também diminuir a rentabilidade de estratégias predatórias, o que pode implicar numa menor atratividade para ampliar o capital se a rentabilidade total associada com a escolha de estratégias mistas for mais baixa.

Então, no problema de decisão de ampliar o capital (investimento) na atividade madeireira os agentes tentam combinar maior eficiência na atividade de extração e processamento, diferentes custos de capital e diferentes graus de risco na atividade ilegal.

Não há qualquer restrição necessária à escolha de estratégias mistas de exploração. Isto significa que as madeireiras irão escolher uma combinação qualquer de células, volumes, classes de árvores exploradas e estratégias de exploração $(\sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^a X_{i,k,s})$ que maximize os seus lucros esperados, dado um grau de governança. Esta combinação qualquer de volumes explorados nas duas estratégias será uma *estratégia mista*. A idéia de que os agentes podem escolher frequentemente estratégias mistas em vez de estratégias puras é consistente com as observações efetuadas na pesquisa de campo desta tese.

A condição de expulsão será:

$$\frac{[\sum_i \sum_k \sum_s X_{i,k,s} |u_j^e > 0] - \bar{Y}_{j,t}}{\bar{Y}_{j,t}} = \theta'_j \quad (4.11)$$

Aqui a madeira j terá que lidar com o problema de que quando a soma das áreas com rentabilidade esperada positiva for menor que a sua capacidade de processamento ela terá que mudar-se para outra área de exploração ou sair do negócio.

4.2.1.5 A decisão de Mudar ou Sair do Negócio

A decisão de mudar dependerá da disponibilidade de áreas com madeira explorável lucrativamente nos pólos madeireiros. O agente calcula as áreas com madeira explorável lucrativamente em outros pólos madeireiros e decide qual o próximo pólo onde ele vai se localizar.

Se nenhum dos pólos madeireiros puder evitar a condição de expulsão ($\phi'_j > 0$) o agente irá sair do negócio. Se houver um ou mais pólos com rentabilidade total esperada suficiente para evitar a condição de expulsão, a madeira j se relocará para o pólo que possua maior rentabilidade esperada. Há várias abordagens possíveis na simulação do modelo: centros mais próximos, menores custos de transporte menor grau de governança, etc. Um problema na simulação é o seu custo computacional (custo de processamento) que pode crescer exponencialmente à medida que se aumenta o número de células, o número de agentes e o número de combinações de estratégias possíveis. Para manter o volume de processamento em um nível computacionalmente adequado foi necessário reduzir o número de pólos madeireiros utilizados na simulação.

4.2.2 A Escolha das Estratégias

O problema da escolha das estratégias está diretamente relacionado com:

- o volume total que pode ser explorado pela madeira j ($\sum_{i=1}^{o_j} \sum_{k=1}^q X_{i,k}$);
- Os custos de capital e extração associados a cada tipo de estratégia de exploração ($c_{4,s}; c_{2,s}$);
- o custo esperado da ilegalidade (λ_j^e) nas áreas exploradas.

Se consideramos um custo de ilegalidade (λ_j^e) suficientemente pequeno (próximo de 0) podemos dizer que é necessário que a rentabilidade da exploração seja maior quando uma estratégia sustentável for escolhida.

O custo da ilegalidade, porém, parece ser um diferencial maior para a adoção de uma estratégia de exploração sustentável (s_1). Quanto maior a probabilidade de perda para a exploração ilegal (g), menor vai ser a atratividade desta exploração. Se o risco de estratégias de exploração predatórias for suficientemente alto, isto vai aumentar muito a atratividade de uma estratégia sustentável, mesmo esta estratégia sendo associada a maiores custos de capital. Se o risco de ilegalidade é baixo, a estratégia sustentável (s_1) se torna menos atrativa que uma estratégia predatória (s_2), visto que os volumes de madeira extraídos e os custos de capital são menores. Isto leva as madeireiras a terem um produto ou com preços mais competitivos no mercado ou com grau de rentabilidade (u_j^e) maior a um mesmo preço de venda.

Um outro aspecto a considerar na escolha das estratégias é a disposição do mercado consumidor de pagar maiores preços para madeira explorada com estratégia

sustentável (s_1). Alguns estudos mostraram que entre 80 e 90% da madeira explorada no Brasil é destinada ao mercado interno. Este mercado é, em geral pouco sensível às práticas de exploração sustentável. O maior diferencial é o nível de preços de oferta da madeira (LIMA, 2003). Além disso, nem todos os compradores do mercado externo estão dispostos a pagar maiores preços para a madeira explorada com estratégias sustentáveis ou a descartar a madeira explorada em estratégias predatórias. Parte do mercado externo é também orientado a preços. Estratégias predatórias podem então se tornar mais atrativas se o mercado for mais orientado a preços e menos sensível (ou menos restrito) à madeira explorada com este tipo de estratégia (s_2).

4.3 Implementação do Modelo

O Modelo foi implementado utilizando o arcabouço para simulação multiagentes desenvolvido para esta tese - `Sim(2ECO)`.

Os agentes implementados são:

`AgForestMetaPop`. Esta classe representa a metapopulação da floresta. Para cada célula X_i haverá um conjunto de árvores de cada classe de árvore. As instâncias desta classe guardam os parâmetros de recrutamento, crescimento, tempo de vida, etc. para cada classe de árvore. Os parâmetros são especificados abaixo:

- *TimberClass* - A classe de árvore;
- *gK1* - Taxa de crescimento e mortalidade para a classe 1;

- $gK2$ - Taxa de crescimento e mortalidade para a classe 2;
- $gK3$ - Taxa de crescimento e mortalidade para a classe 3;
- $cK1$ - Taxa de recrutamento para a classe 1;
- $cK2$ - Taxa de recrutamento para a classe 2;
- $cK3$ - Taxa de recrutamento para a classe 3;
- $damage1$ danos provocados pela estratégia 1;
- $damage2$ danos provocados pela estratégia 2;

AgMill. As instâncias desta classe serão as madeireiras. Cada tipo de madeireira é uma especialização desta classe. Os atributos desta classe serão:

- Y_j - A capacidade de produção da madeireira ($m^3serrado$);
- ϕ_s - o coeficiente de conversão para cada tipo de estratégia($m^3serrado/m^3log, 0 < \phi < 1$);
- $c_{2;j,s}$ - o custo de transporte para cada tipo de estratégia ($US\$/m^3tora/km$);
- $c_{3,s}$ - o custo de processamento por tipo de estratégia ($US\$/m^3tora$);
- $c_{4,s}$ - o custo de capital por tipo de estratégia ($US\%$);
- γ_j - a taxa de queda do estoque de capital;
- ω_j - a taxa de crescimento na capacidade de produção das madeireiras;
- θ_j - A condição de entrada;

- θ'_j - A condição de expulsão;
- K_j - O estoque de capital para a madeireira ($m^3\text{tora}/t$).
 - **AgMillSmall** - Pequenos madeireiros. Estes madeireiros tem maior mobilidade e um grau de risco alto para a atividade. O nível de capital para os pequenos madeireiros é baixo.
 - **AgMillLarge** - Grandes madeireiros. O nível de investimento de capital é maior mas os custos operacionais são dependentes das estratégias de exploração (predatórias têm custos menores).

AgTimberMarket. As instâncias da classe Mercado são responsáveis por determinar o preço da madeira pago às madeireiras. O preço da madeira é determinado por classe de madeira e por estratégia de exploração. A demanda pode crescer lentamente para todas as classes de madeira. Os atributos desta classe são:

- *totalDemmandPerYear*- Demanda total por ano por classe de árvore;
- *priceOfWood*- preço da madeira por classe de árvore, por tipo de estratégia.

Os preços (em $\text{US}\$/m^3$) serão:

- *pK1S1* - Preço para árvores de alto valor (classe $k1$) com a estratégia sustentável (s_1).
- *pK2S1* - Preço para árvores de médio valor (classe $k2$) com a estratégia sustentável (s_1).
- *pK3S1* - Preço para árvores de baixo valor (classe $k3$) com a estratégia sustentável (s_1).

- *pK1S2* - Preço para árvores de alto valor (classe *k1*) com a estratégia predatória (*s₂*).
- *pK2S2* - Preço para árvores de médio valor (classe *k2*) com a estratégia predatória (*s₂*).
- *pK3S2* - Preço para árvores de baixo valor (classe *k3*) com a estratégia predatória (*s₂*).

AgGovernment. A instância da classe “governo” estabelece o “grau de governança” para cada pólo madeireiro explorado³. Este grau de governança representa a probabilidade de $1m^3$ de madeira extraído ilegalmente ser apreendido. O governo também informá as multas aplicadas e os prazos de execução das multas. Os atributos desta classe são:

- *governanceDegree* - grau de governança para cada pólo madeireiro;
- *tx* - tempo de execução das multas;
- *multa* - valor da multa por classe de árvore.

Outros objetos implementados são:

- **HarvStrategiesCosts** - Custos por tipo de estratégia;
- **HarvStrategiesPopulation** - população de estratégias utilizada no algoritmo genético;

³Isto se deve ao fato de que diferentes áreas podem ter graus diferenciados de atuação do Governo

- `HarvStrategy` - implementa a estratégia que será evoluída.
- `ForestCell` - Uma área explorada. Os volumes de madeira por classe de árvore;
- `MillingCenter` - Pólo madeireiro. Inclui as madeireiras instaladas em cada pólo;

4.4 Estratégias: Implementação, Evolução e Equilíbrio

Os agentes escolhem entre alguma combinação de dois tipos de estratégias (sustentável s_1). Estas estratégias serão escolhidas de acordo com os retornos (payoffs) das funções utilidade dos agentes. Os payoffs podem variar com a demanda do mercado e com o nível de oferta de madeira.

Uma *estratégia* indica para o agente, (no caso, o madeireiro) os volumes de madeira a serem coletados, por classe de árvore em cada tipo de estratégia (s_1 e s_2).

4.4.1 O Algoritmo Genético

Algoritmos Genéticos são um tipo de algoritmo evolucionário que busca otimizar funções a partir de uma função objetivo e um processo de busca baseado em variações estocásticas das soluções para a função. Os algoritmos genéticos foram criados por John Holland (HOLLAND, 1975) com inspiração na teoria evolucionária. Um algoritmo genético implanta uma *população de indivíduos*. Cada indivíduo é codificado com as variáveis necessárias para gerar uma solução válida para a função objetivo. Estes indivíduos são codificados como um *cromossomo*. Estes *cromossomos* têm um

estrutura que pode ser dividida e modificada por um processo aleatório. Os *cromossomos* podem então ser combinados em um processo de cruzamento (*crossover*) que gera novos indivíduos com soluções válidas para a função que está sendo otimizada. Estes novos indivíduos são chamados de *descendentes* da população anterior. O processo de cruzamento é dirigido pela função objetivo que se está tentando otimizar. Indivíduos com melhores soluções terão maior probabilidade de seleção para o cruzamento. A seleção para cruzamento é feita por um processo aleatório com as probabilidades de cruzamento ponderadas pelo resultado da função objetivo (*fitness*). Um indivíduo com baixo *fitness* pode ser selecionado para cruzamento. Isto garante que soluções com ótimos locais tenham menor probabilidade de ser escolhidas. Os algoritmos genéticos são bastante úteis para problemas de otimização multidimensional.

Funcionamento do algoritmo genético é o seguinte:

1. uma população de soluções é gerada aleatoriamente e codificada nos cromossomos;
2. as melhores soluções são selecionadas para recombinação;
3. é executada a mutação (e outros operadores de variação dos cromossomos) que pode gerar soluções longe de ótimos locais;
4. a população de descendentes substitui a população anterior melhorando o conjunto de soluções possíveis.

Resultados teóricos e empíricos mostram que os algoritmos genéticos podem en-

contrar soluções para problemas de otimização complexos com velocidade e precisão.

O Algoritmo Genético foi implementado utilizando um arcabouço⁴ de classes implementado por Diego Gomes Deck⁵. Os parâmetros utilizados no algoritmo genético são:

- Probabilidade de Crossover: 98%;
- Probabilidade de Mutação: 0,2%;
- Elitismo: 2 indivíduos.

4.4.2 Implementação das Estratégias no AG

A seleção das estratégias utiliza a função utilidade definida em 4.8. Esta função mapeia a rentabilidade esperada da exploração madeireira, incluindo as combinações das três classes de árvores utilizadas e dos dois tipos de estratégia (s_1 e s_2). A Classe `Harvest` implementa as estratégias. Esta classe tem a seguinte estrutura:

- **Harvest** - variáveis de instância:
 - x_{11} - Volume de m^3 de árvores da classe k_1 , estratégia s_1 ;
 - x_{12} - Volume de m^3 de árvores da classe k_1 , estratégia s_2 ;
 - x_{21} - Volume de m^3 de árvores da classe k_2 , estratégia s_1 ;
 - x_{22} - Volume de m^3 de árvores da classe k_2 , estratégia s_2 ;
 - x_{31} - Volume de m^3 de árvores da classe k_3 , estratégia s_1 ;

⁴*framework*

⁵<http://minnow.cc.gatech.edu/squeak/1716>

- $x32$ - Volume de m^3 de árvores da classe k_3 , estratégia s_2 ;
- *harvCycle* - Ciclo de coleta.

A estrutura **Harvest** permite a implementação completa das estratégias de coleta. Uma estratégia possível pode combinar diversos volumes de árvores com as duas estratégias de coleta (sustentável - s_1 e predatória - s_2).

Uma outra classe auxiliar para a implementação das estratégias é **HarvStratPI**. Esta classe implementa as mesmas variáveis da classe **Harvest**. A classe **HarvStratPI** corresponde a um *indivíduo* no algoritmo genético.

4.4.3 Implementação das Funções Objetivo

A função objetivo implementada incorpora os custos de transporte para cada madeira e os custos de capital. Os custos podem ser diferenciados por tipo de estratégia e os preços da madeira em tora também podem ser diferenciados por tipo de estratégia. Esta função implementa a equação da utilidade esperada (equação 4.8), para uma madeira j qualquer. Pequenas e grandes madeiras têm a mesma função objetivo. A diferença entre pequenas e grandes madeiras é feita apenas pela capacidade de produção. A função objetivo é implementada com o seguinte protocolo:

```
pXi: harv c2: c2 harvCycle: aHarvCycle
```

Onde: **harv** é um objeto da classe **harvest**; **c2** são os custos de transporte; e **harvCycle** é o ciclo de coleta.

As madeiras, então disputam os recursos madeiráveis em torno dos pólos.

Uma madeira grande vai ter custos totais de transporte maiores se ela pegar mais áreas a uma distância maior do pólo. Não foram incorporados no modelo eventuais ganhos de produção devido à escala.

Também não foi incorporado no modelo o custo da multa e o tempo de cobrança das referidas multas, estabelecidos na equação 4.7. Os cenários foram construídos levando em conta apenas uma maior ou menor capacidade do Estado de apreender a madeira extraída ilegalmente⁶. Este parâmetro já produziu mudanças suficientes na dinâmica do modelo para gerar resultados bastante diferenciados para os diversos cenários.

Os cenários construídos também não incorporam a variação de capital ao longo do tempo. Este aspecto necessitaria de uma avaliação mais precisa da dinâmica de longo prazo da indústria, o que não foi possível com os instrumentos de coleta de dados utilizados no trabalho. Apenas a rentabilidade da indústria foi avaliada para os diferentes cenários.

4.4.4 Implementações e Restrições do Algoritmo Genético e do Modelo

A função de *fitness* do algoritmo genético leva em conta, além da função objetivo vista acima, duas restrições fundamentais para dar coerência aos resultados:

- A somatória dos volumes de uma estratégia de coleta (para estratégias puras e mistas) para todas as classes de árvore, não deve superar a capacidade de produção da madeira j ($\sum_i^{o_j} \sum_k^q \sum_s^a X_{i,j,k,s} \leq k_j$).

⁶O parâmetro g da equação 4.7.

- O total dos metros cúbicos coletados não pode superar o volume total disponível nas áreas selecionadas para o madeireiro para a coleta.

Um madeireiro, na simulação, não pode estabelecer uma estratégia de coleta que esteja acima de sua capacidade de produção nem pode montar uma estratégia para coletar mais árvores que as disponíveis nas áreas exploradas. Não há, porém, nenhuma restrição para que os madeireiros selecionem tantas áreas quanto queiram até o limite da sua capacidade produtiva. Também não há nenhuma restrição para que eles escolham uma ou outra estratégia. A seleção de estratégias predatórias (s_2) ou sustentáveis (s_1) bem como os volumes para cada classe de árvore nas células ($\sum_i^{o_j} \sum_k^q X_{i,j,k}$) são determinados pela função objetivo do agente, guardadas apenas as duas restrições estabelecidas acima.

As áreas a serem exploradas são classificadas pela atratividade (equação). O principal componente da atratividade das áreas a serem exploradas é o custo de transporte. Este custo é criticamente dependente da infra-estrutura de estradas da região explorada. Este aspecto está refletido no modelo, na função de determinação dos custos de transporte, que considera o menor custo de transporte entre a área e o polo madeireiro.

A seleção das áreas é feita pelos agentes madeireiros diretamente a partir da atratividade. As áreas mais atrativas (aquelas mais próximas dos polos e das estradas asfaltadas) são selecionadas primeiro. Áreas mais distantes só serão selecionadas quando a atratividade das áreas próximas diminuir devido ao fim do estoque de madeira disponível.

Um modelo para o crescimento e regeneração da floresta foi implementado no simulador. Este modelo está baseado no modelo de Boscolo e Vincent (BOSCOLO; VINCENT, 1998). Os parâmetros de recrutamento e crescimento para a floresta da região, porém, não foram calibrados. Portanto optou-se por não utilizar a implementação do modelo de crescimento. Como os aspectos de longo prazo da atividade madeireira associados à dinâmica da floresta não são considerados neste trabalho, as taxas de regeneração e recrutamento da floresta não são significativas para a tomada de decisão dos madeireiros. Um modelo mais completo que inclua a dinâmica da floresta pode ser implementado em trabalhos posteriores.

Os dados utilizados para calibração do modelo vêm da literatura sobre a atividade madeireira na amazônia e da pesquisa de campo. Nos próximos capítulos serão discutidos os dados e os resultados da tese.

5 *As Madeireiras de Rondônia*

Neste capítulo discute-se os dados secundários e primários levantados na pesquisa bibliográfica e na pesquisa de campo.

5.1 Metodologia de Coleta dos Dados

Os dados analisados no trabalho têm três fontes básicas:

- *Literatura e Dados Secundários*: O levantamento de dados secundários existentes nas publicações técnicas da área e também relatórios e pesquisas publicadas sobre a atividade madeireira na Amazônia e em Rondônia.
- *Dados Primários*: Foi feita a aplicação de questionários em 84 madeireiras em funcionamento em Rondônia. Estes questionários são a fonte para a validação dos resultados do trabalho.

5.2 Os Agentes: A indústria Madeireira

Dois trabalhos disponíveis sobre a indústria madeireira no Pará (VERISSIMO, 1992; STONE, 1997) mostram que a participação de pequenas e médias madeireiras

Tabela 4: Produção Estimada de Madeira - Paragominas (1992).

Tipo de Madeireira	Número	Produção *	Part.(%)	Part. Acumulada (%)
1 serra de fita	196	842.800	68,76	68,76
2 a 3 serras de fita	24	196.800	16,06	84,82
4 a 7 serras de fita	5	99.000	8,08	92,89
Laminadora	13	87.100	7,11	100,00
Total	238	1.225.700		

Fonte: (VERISSIMO, 1992)

*($m^3.ano^{-1}$)

no total da oferta é grande. Em um estudo feito em 238 madeireiras de Paragominas (um velho pólo madeireiro do Pará), Veríssimo et. al.(VERISSIMO, 1992, p. 186) estimam que madeireiras com uma serra-fita respondiam 4 por 68,76% de participação acumulada na produção total amostrada. Madeireiras com até 3 serras correspondiam, no estudo, a 84,82% de participação acumulada na produção total amostrada. Isto é, somando-se a produção das madeireiras com até 3 serras-fita, tem-se mais de 80% da produção. Se a comparação for feita pelo número de empresas, as madeireiras com uma serra-fita correspondem a 82,35% do total de empresas.

O estudo de Stone (STONE, 1997, pp. 56-57), uma amostra feita em 92 madeireiras de Breves, Tailândia e Paragominas) mostra que madeireiras de até 1 serra de fita participavam com 37,70% da produção total amostrada e as madeireiras com até 3 fitas participavam com 63,64% da produção (Tabela 5). Um outro estudo mais recente sobre o padrão de exploração feito por Nepstad et al. (NEPSTAD, 1999) estima que a atividade madeireira foi responsável, em 1996, por 50-90% do desflorestamento total na Região¹. No mesmo artigo (p. 506, Tabela 1), os autores colocam que 49% da produção de madeira em tora é feita num padrão de extração

¹Os autores usam os dados do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) como fonte para medir o desflorestamento (INPE, 1997).

Tabela 5: Estatísticas de Produção por Tipo de Madeireira ($m^3 ano^{-1}$) - Pará (Breves, Tailândia e Paragominas)

Tipo de Madeireira	Número	Produção	Part.(%)	Part.Acum.(%)
Circular	14	12.288	1,78	1,78
1 serra de fita	49	248.186	35,92	37,70
2 serras de fita	11	104.148	15,07	52,77
3 serras de fita	4	75.120	10,87	63,64
4 serras de fita	1	18.00	2,61	66,25
5 serras de fita	1	26.640	3,86	70,10
Laminadora - 1 torno	1	8.400	1,22	71,32
Laminadora - 2 tornos	4	39.000	5,64	76,96
Laminadora - 3 tornos	2	58.800	8,51	85,47
Compensados - 1 linha de produção	2	12.600	1,82	87,30
Compensados - 3 linhas de produção	3	87.760	12,70	100,00
Total	92	690.942		

Fonte: (STONE, 1997).

de baixa intensidade e outros 41% da produção total estimada com um padrão de média intensidade. Então, somente 10% da produção de madeira da região é feita em um padrão de exploração de alta intensidade². Esta baixa intensidade pode estar relacionada ou com a presença de uma pequena quantidade de árvores madeiráveis na área de extração e também com um padrão de extração seletivo de madeira.

Supondo que a estrutura do setor madeireiro está baseada em uma distribuição da produção onde as madeireiras com até duas serras de fita têm a maior participação (50% da produção total) com um padrão de exploração seletivo (90% de baixa e média intensidade) pode-se perguntar se há alguma correlação consistente entre o tamanho das madeireiras e o padrão de exploração praticado. Mais que isso, se as pequenas e médias madeireiras têm uma participação importante na oferta de madeira e no processo de formação de preços, o padrão de exploração e os custos

²Os autores definem exploração de baixa intensidade como $19 m^3 ha^{-1}$, média como $28 m^3 ha^{-1}$ e alta como $40 m^3 ha^{-1}$ usando um intervalo de confiança de 95%.

associados a ele podem ser determinantes na escolha sobre estratégias de extração de baixo impacto com manejo florestal para a indústria como um todo.

Se o mercado de oferta de madeira a ser estudado satisfaz as seguintes condições:

1. Existência de estoques de árvores madeiráveis;
2. Uma estrutura de mercado com participação significativa de pequenas e médias madeireiras exibindo baixo investimento de capital e capacidade de alavancagem;
3. A maior parte destas madeireiras praticam, exploração seletiva, com alto impacto ambiental e baixos custos operacionais (*predatória*) em vez de estratégias de exploração manejadas de baixo impacto (*sustentável*);
4. Baixos riscos com a fiscalização para os processos de extração ilegal de madeira;
5. Um mercado concorrencial onde os preços são pouco influenciados pela estratégia de exploração da madeira. Isto é o mercado não diferencia significativamente os preços para a madeira coletada no manejo de impacto reduzido.

Há pouco ou nenhum incentivo para as madeireiras (grandes, médias ou pequenas) migrarem para uma estratégia de exploração sustentável, pois os retornos (*payoffs*) de uma estratégia predatória são significativamente maiores.

Uma situação deste tipo implica em uma maior participação de estratégias predatórias na atividade madeireira. A lógica associada a estas estratégias é que, ater-se a planos de manejo e técnicas de baixo impacto, implica em uma maior área explorada e menor taxa de exploração por hectare. Se não há mecanismos de fiscalização

Tabela 6: População Urbana e Rural de Rondônia (1970-2000)

Anos	Pop. Urbana	% Urbana	Pop Rural	% Rural	Total
1970	60.541	51,91	56.079	48,09	16.620
1980	239.436	47,59	263.689	52,41	503.125
1991	658.172	58,20	472.702	41,80	1.130.874
1996	762.864	61,97	468.143	38,03	1.231.007
2000	883.048	64,09	494.744	35,91	1.377.792

Fonte: IBGE Censos demográficos 1970-2000

que punam a exploração predatória, os madeireiros tenderão a usar este tipo de estratégia. A migração para estratégias sustentáveis pode ser feita com a diminuição da atratividade da estratégia predatória. Esta diminuição pode acontecer com um aumento da fiscalização, punindo a exploração predatória ou com mecanismos de incentivo para a adoção de estratégias sustentáveis produzindo uma maior rentabilidade destas estratégias.

5.3 A Atividade Madeireira em Rondônia

Rondônia foi o espaço privilegiado da colonização dirigida durante as décadas de 1970 e 1980. A população de Rondônia saltou de 166.620 em 1970 para 1.377.792 em 2000 (Tabela 6). Boa parte desta população (64%) está hoje nas cidades mas vivem em áreas rurais cerca de 494.700 pessoas. Este volume de gente movimenta uma produção agrícola diversificada e baseada na pequena e média propriedades.

Esta ocupação produzida pela colonização estabeleceu uma enorme pressão sobre os recursos naturais da região. Não só a produção agropecuária foi uma fonte de conversão da floresta em pasto ou plantações, mas a extração de madeira afetou boa parte da floresta da região virtualmente extinguindo espécies como mogno e cedro

Tabela 7: Número de Planos de Manejo Protocolados em Rondônia (1986-1998)

Ano	No. planos	Hectares	m^3
1986	1	10.671,00	198.784,00
1987	5	4.727,00	126.453,00
1988	5	3.541,00	110.365,00
1989	12	27.815,00	815.263,00
1990	3	6.650,00	291.420,00
1991	4	2.986,00	86.933,00
1992	1	2.015,00	33.812,00
1993	11	7.809,00	155.392,21
1994	10	7.021,34	148.318,06
1995	15	28.904,00	1.516.757,35
1996	15	22.577,02	423.140,03
1997	6	3.614,00	50.956,67
1998	5	1.102,00	49.384,27
Total	93	129.432,36	4.006.978,59

Fonte: IBAMA (IBAMA, 2000)

das áreas exploradas.

Rondônia é o terceiro produtor de madeiras em tora do Brasil (IBAMA, 2000) atrás apenas dos estados do Pará e Mato Grosso. A extração madeireira em Rondônia contava em 1997 com 364 unidades produtivas (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001).

Dados do IBAMA (Tabela 7) sobre planos de manejo florestal sustentável (PMFS) mostram que, entre 1986 e 1998 foram protocolados 93 planos de manejo o que perfazia uma área de 129.432,36 hectares e um volume de 4.006.978,59 m^3 . Embora estes planos possam conter informações imprecisas ou incorretas e provavelmente mostrem um volume menor que o total de madeira extraído na região, eles demonstram qual o volume que os madeireiros pretendiam extrair “oficialmente” dentro de planos de manejo em terras próprias ou arrendadas. Estes dados sobre a apresentação de planos de manejo também mostram o total do “estoque” de madeira

estimado oficialmente pelos madeireiros. Também é necessário dizer que é possível que as mesmas áreas tenham sido protocoladas duas vezes em diferentes planos de manejo em momentos diferentes. Isto significa que as áreas em planos de manejo estão provavelmente superestimadas.

Mesmo com esta superestimação os volumes totais protocolados próximos aos volumes de produção anual estimada em (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001), ($\approx 3.900.000 m^3$ para 1997) e aos volumes informados pelo IBAMA (IBAMA, 2000) ($\approx 4.200.000 m^3$, para 2001).

5.3.1 As Divergências nas Estimativas

Um problema crítico associado aos dados sobre a produção madeireira em Rondônia é a divergência entre as estimativas produzidas por diversas instituições. Estas divergências nas estimativas podem estar associadas a vários problemas desde metodologia de coleta de dados (como a estimação da produção de madeira em tora do IBGE) até problemas associados aos registros e extração ilegal (como os dados dos PMFS do IBAMA). Esta inconsistência nas diversas estimativas oficiais leva a grandes dificuldades na comparação de dados históricos da indústria madeireira, visto que as melhores estimativas disponíveis passam a ser trabalhos baseados em pesquisa de campo associados a instituições governamentais e não-governamentais. Dados de produção de madeira em tora, para a safra de 1996/1997 em Rondônia, por exemplo, variam em uma escala de 10 vezes entre uma estimativa e outra. Comparando os dados da produção de madeira em tora estimada pelo IBGE para Rondônia neste ano ($333.000 m^3$ de tora), e a estimativa feita pelo IMAZON para este mesmo ano

Tabela 8: Zonas Propostas no Planaflo

Zona	Hectares	%
Agropecuária (1.1,1.2)	9.208.136,06	38,61
Exploração Florestal Consórcios Agroflorestais (1.3,1.4)	2.822.911,73	11,84
Prioritária para preservação (2)	3.483.442,04	14,60
Reservas, Parques etc (3)	8.336.790,06	34,95
Total	23.851.279,89	

Fonte: Governo do Estado de Rondônia (RONDÔNIA, 2002)

(3.921.000 m^3 de tora) vê-se que esta divergência tem uma importância fundamental para a avaliação do impacto da extração madeireira na floresta da região.

Embora a atividade de extração ilegal possa ser significativa, dificilmente este volume teria uma escala de 10 vezes. Uma avaliação da comercialização de madeira no Brasil, feita pelo IBAMA (IBAMA, 2000) apresenta o valor de 4.220.000 m^3 de madeira em tora. Este valor está muito mais próximo da estimativa do IMAZON que dos dados apresentados pelo IBGE. Estes dados do IBAMA permitem inferir que os valores da produção de madeira em tora do IBGE estão claramente subestimados.

5.3.2 Uso do Solo

Rondônia completou um zoneamento sócio-econômico-ecológico dentro do contexto do *Plano de Desenvolvimento Agro-florestal*³ do Estado de Rondônia. Este zoneamento propõe o uso diversificado das áreas do estado tentando manter um uso sustentável das florestas ainda existentes fora das áreas de reservas e parques.

Aproximadamente 12% da área do estado é reservada para a exploração madeireira e consórcios agroflorestais (Tabela 8. Supondo grosseiramente uma produtividade média de 24 $m^3 ha^{-1}$ e que toda esta área seja ocupada com a produção

³PLANAFLO

madeira; o volume de madeira o que poderia ser extraído em um ciclo de corte de 30 anos, seria de 2,3 milhões de m^3ano^{-1} . A comercialização de madeira estimada pelo IBAMA para o estado de Rondônia é de 4.200 milhões m^3ano^{-1} , isto implica que parte da madeira que está sendo extraída do estado deve ter ou:

1. um ciclo de corte mais curto;
2. estar sendo retirada das áreas de preservadas dentro da zona1, ($\approx 4,5$ milhões ha) como, por exemplo, resultado de derrubadas;
3. estar sendo retirada de áreas das zonas 2 e 3.

A hipótese mais provável é uma combinação destas três formas de acesso ao recurso madeireiro. Porém, à medida que o recurso vai se tornando escasso, a pressão sobre as áreas protegidas das zonas 2 e 3 vai aumentando. A extração ilegal de madeira de áreas protegidas, portanto, tende a ser um problema cada vez maior.

A área afetada pela atividade madeireira em Rondônia é estimada por Nepstad et al (1999) em 153.200 $ha.ano^{-1}$. Com a extração madeireira tradicional, estas áreas afetadas são, muitas vezes novas áreas onde se pratica a extração seletiva de madeira. A ocupação de novas áreas para extração seletiva de madeira pode diminuir caso um número maior de madeireiros adotem práticas de manejo sustentável da floresta.

5.3.3 Características das Madeireiras em Rondônia

Na distribuição das indústrias do setor madeireiro, dados publicados pela Federação das Indústrias do Estado de Rondônia⁴ (Tabela 9 apontam para uma di-

⁴FIERO

Tabela 9: Rondônia - Composição do Segmento Madeireiro/Moveleiro: Principais Atividades (1989-1997)

Ramo de Atividade	1989	%	1994	%	1997	%
Desdobramento de Madeira	781	66,07	535	45,69	180	14,72
Fabricação de Estruturas de Madeiras e Artigos de Carpintaria	264	22,34	135	11,53	298	24,37
Chapas e placas de Madeira Aglomeradas e Compensadas	7	0,59	34	2,90	34	2,78
Artigos Diversos de Madeiras	35	2,96	233	19,90	173	14,15
Fabricação de Móveis de Diversos Tipos	95	8,04	234	19,98	538	43,99
Total	1182		1171		1223	

Fonte: Cadastro Industrial SEBRAE/FIERO (SEBRAE, 1997)

Perfil Sócio-Econômico de Rondônia (RONDÔNIA FIERO, 1997)

minuição da participação das serrarias (atividade desdobramento de madeira) no estado. A participação das serrarias caiu de 66% para 15% do total de indústrias do segmento madeireiro, moveleiro.

Esta diminuição pode tanto se dever a uma menor rentabilidade no segmento durante o período estudado (com crise da era Collor e a supervalorização do Real a partir de 1994), bem como a uma maior dificuldade para a atividade de extração, associada:

1. ao aumento da fiscalização;
2. a uma maior restrição ao acesso aos recursos madeireiros associada à obrigações legais com planos de manejo;
3. e também a uma diminuição dos estoques de madeira disponíveis na área.

Estes três fatores podem ter contribuído com a diminuição da participação das processadoras no setor. Os dados da FIERO/SEBRAE apontam também para um

crescimento da indústria moveleira na região.

Os números levantados para o número de indústrias processadoras de toras são diferentes (Figura 5) dos valores publicados em (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001). Estes dados, porém, são dificilmente comparáveis, visto que foram tomados em momentos diferentes e com metodologias diferentes.

5.3.4 Quantidade e Localização das Serrarias

Os dados fornecidos pelo IMAZON e ISA para os pólos madeireiros, mostram que os pólos madeireiros estão distribuídos em todo estado.

Rondônia apresenta, para (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001) 19 pólos madeireiros (Tabela 10), distribuídos principalmente no eixo da BR-364. Observações de campo, porém, apontam para o surgimento de novos pólos madeireiros em regiões mais distantes da BR-364. Pólos como: Nova Mamoré, Machadinho, Seringueiras, Cujubim e Monte Negro estão localizados em novas áreas de expansão da ocupação em Rondônia, associando as vantagens da abertura da fronteira agrícola com uma diminuição dos custos de acesso a novas fontes de matéria-prima. A dinâmica de expansão dos pólos em Rondônia parece seguir uma combinação entre as frentes de expansão populacional (novos projetos de colonização) com a disponibilidade de matéria prima (áreas de floresta com pouca perturbação).

O raio mínimo dos pólos se situa entre 5-10 Km nos municípios onde a exploração madeireira é mais recente e de 40-45 Km para os municípios onde a exploração é mais antiga. Outros fatores também determinam este raio. Os principais são a

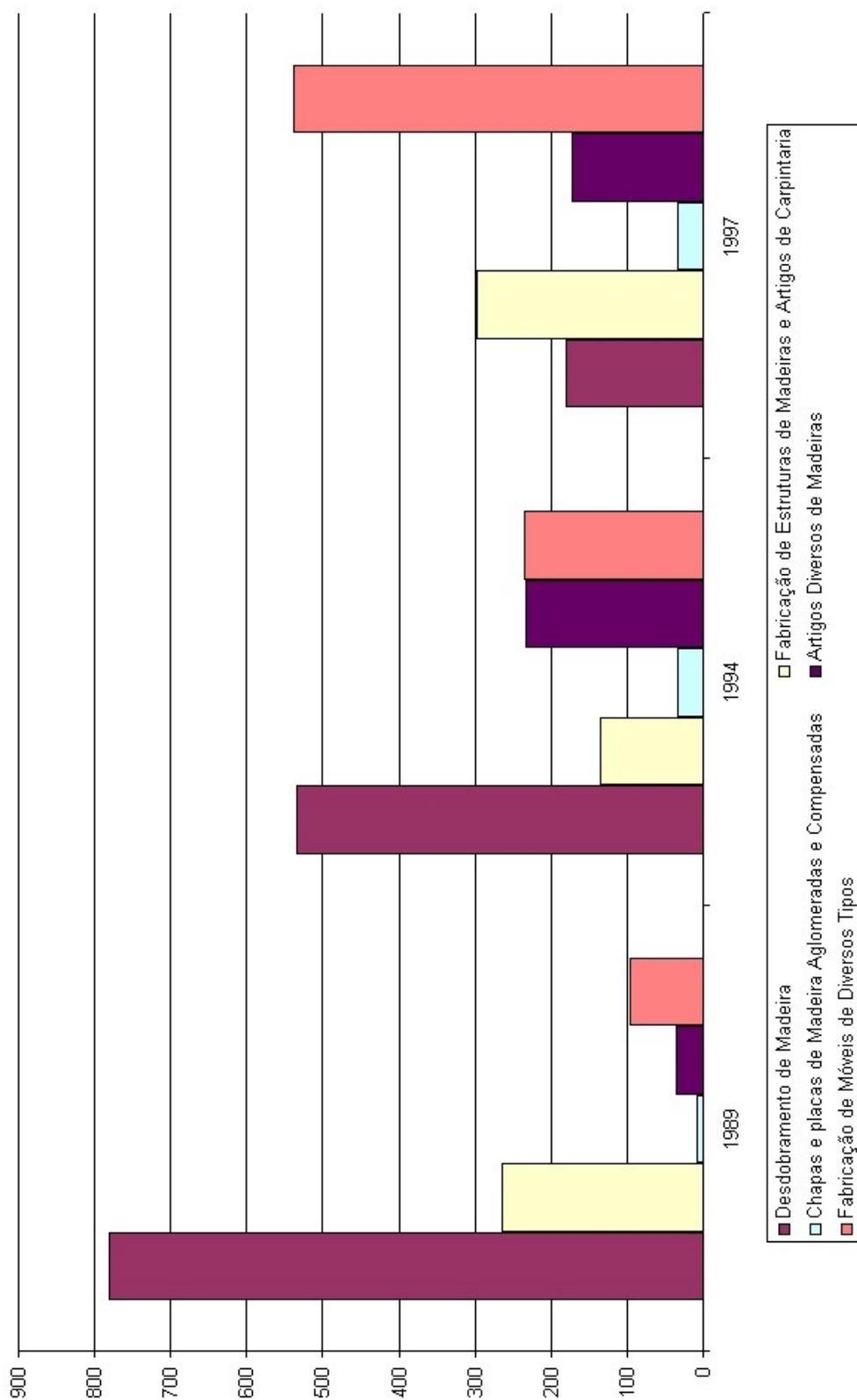


Figura 5: Madeireiras por Setor de Atividade

Tabela 10: Porte das Indústrias (%) e Intensidade da Exploração nos Pólos Madeiros - RO

Pólo	No.	Porte (%)				Intens*	$m^3_{tora}.ano^{-1}$
		Micro	Pequena	Média	Grande		
Alta Floresta d'Oeste	14	18	62	20		2	130.000
Alto Paraíso	12		83	17		2	155.000
Ariquemes	55	23	38	23	15	2	525.000
Buritis	14		29	71		2	250.000
Campo Novo	14	30	50	20		2	135.000
Cacoal	10	20	60	20		1	110.000
Cujubim	11		67	36		1	145.000
Espigão d'Oeste	14		86	14		2	165.000
Jaru	25		46	15	38	2	253.000
Ji-Paraná	45	18	32	29	21	2	325.000
Machadinho d'Oeste	15	18	27	45	9	2	235.000
Monte Negro	12	22	44	33		2	155.000
Ouro Preto d'Oeste	13	14	29	43	14	1	140.000
Nova Mamoré	12		55	23	22	2	135.000
Pimenta Bueno	13	14	29	43	14	1	155.000
Rolim de Moura	11		20	80		2	118.000
Seringueiras	14		45	40	15	2	150.000
Porto Velho	25	31	46	23		1	265.000
Vilhena	35		24	47	29	2	375.000
Somatória	364						3.921.000

Fonte: IMAZON (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001)

* Intensidade: 1-Baixa; 2-Moderada

presença de árvores de maior valor e a existência de uma rede de estradas melhor mantida e com maior quilometragem.

Segundo dados do IBAMA (1997,1999), o número de planos de manejo protocolados em Rondônia entre 1986 e 1998 é de 96 (Figura 6). A maior parte destes planos foi protocolada entre 1993 e 1998. Uma divergência óbvia é com o número de madeireiras existente no estado. Isto significa que a maior parte das madeireiras está trabalhando sem plano de manejo.

A maior parte da produção madeireira da Amazônia é de madeira serrada. Embora as empresas moveleiras tenham aumentado a produção, ainda não há uma grande demanda externa para a produção desta indústria. Do total da produção de madeira processada da Amazônia, segundo dados do IMAZON (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004, p. 36) 68% da produção de madeira da Amazônia Legal é Madeira serrada. Os outros 34% dividem-se em Madeira Beneficiada (11%) e Laminados e Compensados (21%). Rondônia tem os valores de 45% para madeira serrada, 22% para beneficiados e 33% de compensados. Apesar da condição atípica do estado de Rondônia, ainda assim, do total da produção processada, a madeira de maior valor não chega a 60% do total (cerca de 981 mil m^3). Estes valores parecem contrastar com os dados da FIERO para o número de indústrias moveleiras em Rondônia, que mostravam um expressivo crescimento da indústria moveleira no estado. Estas indústrias são, em sua maioria de pequeno porte, notadamente voltadas para o mercado local. O que implica em uma renda agredada relativamente pequena derivada da atividade moveleira. O desdobramento de madeira continua sendo a maior fonte

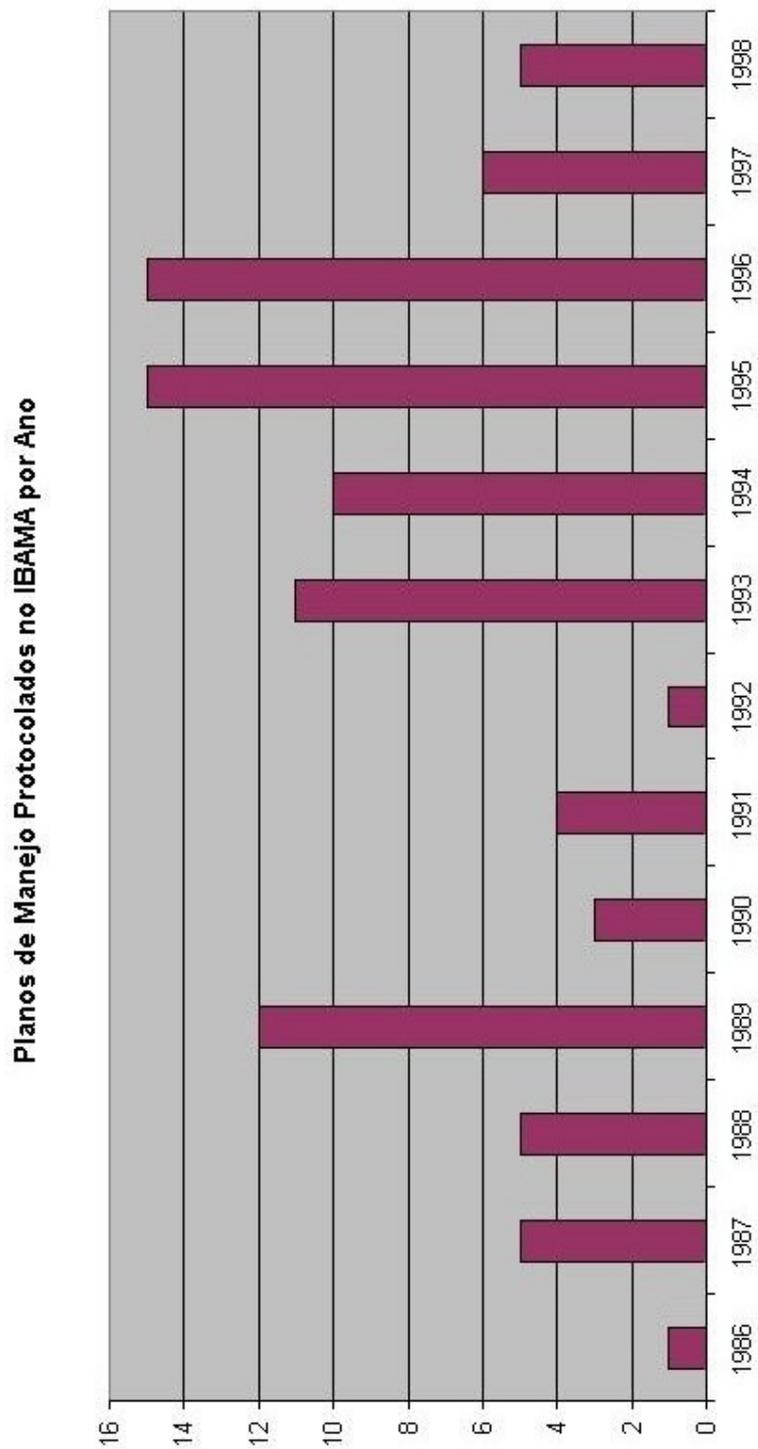


Figura 6: Número de Planos de Manejo Protocolados pelo IBAMA (1986-1996)

Tabela 11: Produção de Madeira Processada da Amazônia (%)

Estado	Serrado	Beneficiada	Laminados e Compensados
Acre	82	12	6
Amapá	63	37	
Amazonas	55	28	17
Maranhão	52	13	35
Mato Grosso	69	11	20
Pará	77	6	17
Rondônia	45	22	33
Roraima	91	9	
Tocantins	67	25	8
Total	68	11	21

Fonte: (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004, p.36)

de receita da indústria madeireira. Madeira serrada e madeira com baixo grau de processamento continuam sendo os produtos mais importantes da indústria.

Pessoal Empregado na Atividade

Os empregos diretos gerados pela atividade madeireira, segundo os dados de (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004) é de 127,3 mil trabalhadores para a Amazônia e 20,2 mil para Rondônia. Comparando isto com a produção de madeira do mesmo estudo⁵, e tem-se um total de 0,012 trabalhadores por m^3 para a Amazônia 0,011 trabalhadores por m^3 para Rondônia. Uma estimativa rápida mostra uma ampliação da produção madeireira em 1 milhão de m^3 pode produzir um aumento do pessoal empregado em aproximadamente 11.800 empregos diretos⁶.

Destino da produção

A maior parte da produção madeireira da Amazônia destina-se ao mercado in-

⁵10.792 milhares de m^3 de madeira serrada para a Amazônia e de 1.784 milhares de m^3 de madeira serrada para Rondônia

⁶Este cálculo foi feito considerando-se a hipótese de relações técnicas de produção homogêneas e da inexistência de ganhos associados às escalas de produção

Tabela 12: Madeira Vendida dos Estados da Amazônia Legal para Regiões do Brasil, São Paulo e Exterior (Milhares de m^3 processados)

	S	SP	SE ⁷	NE	NO	CO ⁸	Exterior	Total
Acre	9	14	5		46	0,5	0,5	75
Amapá					56			56
Amazonas	45	20			35		181	281
Maranhão	34	51	10	163	3	6	16	283
Mato Grosso	1.390	1.206	682	86	153	178	224	3.919
Pará	383	468	681	1.149	298	255	1.021	4.255
Rondônia	564	344	594	13	84	56	129	1.784
Roraima					63		28	91
Tocantins				14	16	14	4	48
Total	2.425	2.103	1.972	1.425	754	510	1.604	10.792

Fonte: (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004, p.69)

legenda: S - Sul, SP- São Paulo, SE - Sudeste, NE - Nordeste, CO - Centro Oeste
MT - Mato Grosso.

terno. Os dados de Lentini et al (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004, p.69) mostram que 14,86% da produção madeireira da Amazônia é destinada ao exterior. Isto implica que, mais de 80% da produção é consumida no mercado interno. A situação atípica é do estado do Amazonas que destina 64% da sua produção para o exterior(181 milhões de m^3). Os estados do Mato Grosso e Rondônia destinam respectivamente 48,18% e 52,58% da produção para a região sudeste. A região Sul corresponde a 31,61% da demanda de madeira serrada de Rondônia e 35,47% da demanda para o Mato Grosso.

Os dados da FAO (FAO, 2004), para a produção e exportação de madeira serrada de 1980 até 2002, subiu de uma participação média de 6% da produção total para uma média de 8%. As exportações, segundo os dados da FAO, continuam a ter uma participação relativa pequena no total da produção de Madeira serrada (Figura 7).

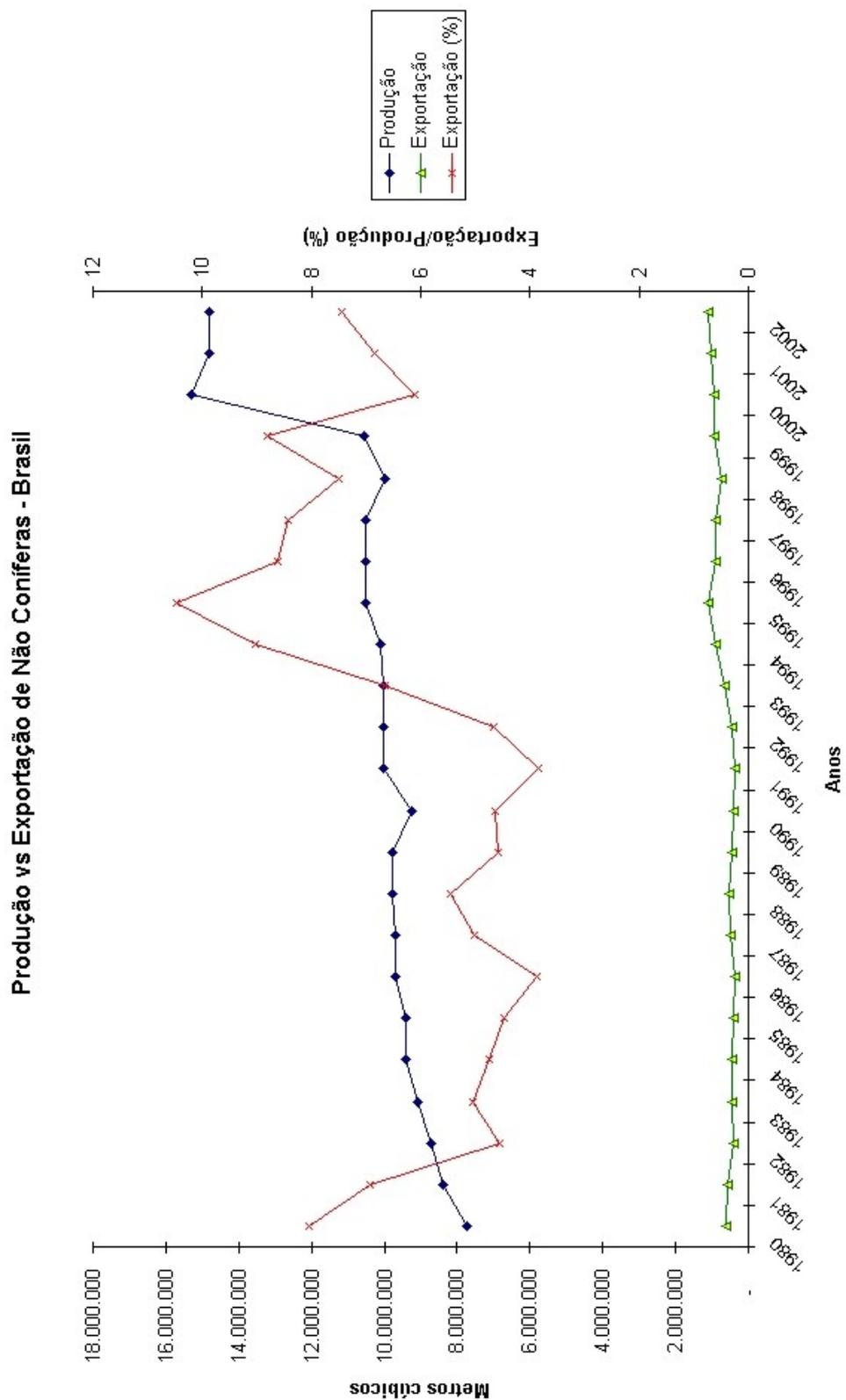


Figura 7: Produção vs Exportação de não coníferas - Brasil (1980-2002)
 Fonte: (FAO, 2004)

5.4 Os Custos, Rentabilidade e Estratégias

No modelo implementado aqui tem-se os seguintes componentes de custo:

- *Custo de Coleta* (c_1) - O custo de coleta é o custo necessário para desbaste e corte das árvores. Inclui também os custos do pagamento aos proprietários de terra pela madeira coletada;
- *Custo de Transporte* (c_2) - O custo de transporte é o gasto necessário para trazer as toras de madeira até a serraria. Este custo não inclui os custos de transporte do pólo madeireiro até os consumidores ou atravessadores.
- *Custo de Processamento* (c_3)- Os custos de processamento incluem os custos de folha de pagamento e outros custos operacionais para a serragem da madeira.
- *Custo de Capital* (c_4) - O custo de capital envolve o investimento na aquisição de áreas para a coleta de madeira, equipamentos e o investimento em planos de manejo.

Outros componentes fundamentais para a implementação do Modelo são:

- *Tributos* - cobrados pelo governo sobre a madeira (τ)- Os tributos são cobrados de todas as madeireiras. Incluem impostos sobre a produção e comercialização da madeira. Estes tributos podem ser diferenciados a partir da estratégia escolhida pela madeireira. Este é um tipo de política pública que pode ser implementado.

- *Preços* - Por tipo de madeira e por estratégia. Estes preços podem ser diferenciados pelo tipo de estratégia. A suposição é que a tendência de longo prazo dos preços é um aumento dos preços pagos para a madeira coletada com estratégias sustentáveis.
- *Grau de governança* - Definido pela equação 4.6. É a probabilidade de o madeireiro ter apreendida a madeira extraída ilegalmente (com estratégias predatórias).

Os custos de produção e a rentabilidade das madeireiras na Amazônia são objetos de estudo de diversos trabalhos. (UHL, 1991) incluem uma discussão sobre os atores da atividade madeireira e sobre os custos e rentabilidade da extração. Os autores apontam uma renda de produção de uma serraria típica do município de Tailândia, de US\$ 2.250, para custos totais de US\$ 1.150. Isto implica em uma renda líquida de US\$ 1.100. Estes valores são para uma média de $16m^3ha^{-1}$ de madeira extraída.

Em outro trabalho, (ALMEIDA; UHL, 1998) estimam que a produção madeireira manejada em Paragominas poderia ter uma rentabilidade mais alta para um ciclo de corte de trinta anos. Este fato seria oposto ao ciclo de corte estimado para a exploração predatória que seria de 90 anos. O aumento da rentabilidade seria consequência desta redução no ciclo de corte (provocada pelo aumento da taxa de crescimento das árvores e de uma maior eficiência no processo de coleta na floresta, que implicaria em menores danos e menores perdas por árvores não encontradas. Ainda com esta suposição de redução dos ciclos de corte em 60 anos (ALMEIDA; UHL, 1998) mostram que as taxas de retorno da atividade madeireira não mane-

Tabela 13: Preços da Madeira em Pé em áreas próximas a FLONAS (R\$/m³_{tora})

Flonas	Baixo Valor	Médio Valor	Alto Valor
Caxinauã	5,45	-	16,33
Tapajós	4,50	6,25	11,25
Bom Futuro/Jamari	5,45	11,40	19,00
Tefé	2,32		

Fonte: (VERÍSSIMO; BARRETO, 1999) e (ARIMA; VERÍSSIMO, 2002) a partir de dados de pesquisa do IMAZON.

jada estão em torno de 108% enquanto a taxa de retorno da atividade madeireira com manejo é de 103%. Estes valores indicam um maior retorno de estratégias de extração predatórias. Este estudo apresenta também uma necessidade de capital maior para a exploração manejada (em torno de 21,3% a mais).

Numa estimativa dos custos da madeira em pé em áreas próximas a algumas florestas nacionais da Amazônia (FLONAS) (VERÍSSIMO; BARRETO, 1999) e (ARIMA; VERÍSSIMO, 2002) encontraam os seguintes valores de madeira em pé pagos aos produtores (Tabela 13).

Estes resultados demonstram o baixíssimo preço pago pelo metro cúbico de madeira em pé aos proprietários de áreas com recursos madeiráveis. Este custo baixo é um entrave à implantação de uma política que viabilize estratégias de exploração manejadas (sustentáveis).

Um estudo feito pelo PRONATURA/IIED/GTZ (MAY, 2000) mostra que os custos extras associados à certificação são maiores que os custos associados ao manejo convencional. Este estudo compara as avaliações de custo do IMAZON⁹ e da FFT¹⁰ com duas empresas certificadas (Gethal e Rohden). O estudo mostra que os

⁹Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia

¹⁰Fundação Floresta Tropical

Tabela 14: Custos do Manejo Convencional versus Manejo SUSTentável (US\$/m³)

Custos (US\$/m ³)	Gethal	Rohden	Imazon	FFT
Manejo convencional:			19,96	15,68
Manejo sustentável:				
Volume médio explorado ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	22,5	23,0	38,6	25,36
Derrubada da madeira	1,46	1,60	0,25	0,62
Abertura trilhas/estradas	0,78	0,73	0,22	0,14
Abertura de pátios			0,07	0,14
Arraste de toras	5,62	2,35	1,31	1,24
Embarque das toras	3,68	0,48	2,59	1,28
Outros custos	11,96	0,95	4,18	1,14
Total da Exploração	23,50	6,11	8,62	4,56
Planejamento exploração	2,51	7,84	1,87	1,47
Transporte até serraria	11,84	1,79	11,00	-
Preço da madeira em pé	2,00	5,40	5,00	7,61
Custos Totais	37,85	21,14	26,49	13,64
Preço pago a fornecedores	35/40,00	21,60	n.d.	n.d.
Processo de certificação(inicial)	0,03	0,05	n.d.	n.d.
Auditorias anuais	0,04	0,27	n.d.	n.d.
Custos sociais	-	n.d.	n.d.	n.d.

Fonte: (MAY, 2000)

custos (em US\$/m³) para o manejo sustentável para as empresas analisadas são de US\$35,85(Gethal) e US\$21,14 (Rohden). Os custos do manejo convencional são de US\$19,96 (IMAZON) e US\$15,78 (FFT). A isto ainda se acrescentam os custos diretamente associados a processos de certificação que está aproximadamente entre 0,07 - 0,32 US\$/m³.

O estudo (MAY, 2000) conclui que os custos ainda são uma barreira relevante para a adoção de uma estratégia de exploração sustentável pelas empresas. Mesmo aquelas com maior investimento de capital e melhor grau de organização (como é o caso das empresas estudadas). Os principais entraves para a adoção de práticas de manejo sustentável, levantados no estudo são:

1. Custos associados à legalização da atividade. Adotar Planos de Manejo Florestal, implica em custos com inventário, planejamento da exploração e da extração, e avaliação dos impactos ambientais.
2. Custos associados à aquisição de terras exigida pela legislação e à dificuldade de aquisição de terras legalizadas;
3. A concorrência da exploração ilegal. A exploração ilegal, pouco combatida e pouco punida promove uma concorrência com a exploração sustentável implicando em pouca atratividade de estratégias de exploração deste tipo. Iso está associado ao fato do principal mercado comprador (o mercado interno do Sul/Sudeste) ser, em sua maior parte, indiferente à madeira explorada com estratégias sustentáveis.
4. Maiores custos de investimento e dificuldades de acesso ao crédito. Crédito diferenciado para a exploração sustentável pode diminuir os custos de capital e promover um aumento do uso de estratégias sustentáveis em detrimento das predatórias;
5. Falta de pessoal especializado (tanto gerencial, quanto operacional);

Todas estas dificuldades são entraves para a adoção de práticas de manejo sustentável isto acaba fazendo com que as estratégias de exploração utilizadas pelas madeiras sejam, em grande medida, predatórias. Apenas com algum tipo de política específica para fomentar a adoção de estratégias sustentáveis, que supere os entraves citados é que as práticas de manejo sustentável podem se tornar uma

alternativa viável para os produtores.

5.5 Os Resultados da Pesquisa de Campo

Foram aplicados em novembro e dezembro de 2004, em Rondônia, 84 questionários com madeireiras em atividade nos municípios de Ariquemes, Espigão do Oeste, Cacoal, Jaru, Vilhena, São Miguel do Guaporé, Ji-Paraná, Rolim de Moura e Alta Floresta do Oeste. Estes questionários fazem parte de uma pesquisa maior sobre madeireiras para toda a Amazônia que está sendo efetuada pelo WHRC ¹¹ e IPAM ¹². O questionário aplicado tem como base o modelo estabelecido por Steve Stone para a indústria madeireira (STONE, 1997, 1998a, 1998b). Este questionário levanta valores sobre produção, custo, faturamento, capital. Foram levantados também dados sobre o padrão de exploração das madeireiras.

Um problema encontrado na amostragem é que os dados levantados apresentam alta variância. Este fato pode ser decorrente de uma variância muito grande na população amostrada (muitas diferenças entre grandes e pequenas madeireiras, nível de capital e/ou tempo de existência ou também, parte destas diferenças pode ocorrer por omissão de dados ou informação incorreta dos madeireiros. Este último fator pode ter sido provocado pelo medo dos madeireiros em relação ao fornecimento de dados sobre a produção e exploração de madeira que pudessem ser utilizados para subsidiar eventuais ações de fiscalização, visto que parte da extração madeireira é ilegal.

¹¹Woods Hole Research Center

¹²Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

Nas questões sobre o padrão de exploração das madeiras levanta-se se o produtor explora ou não a floresta, se compra madeira de terceiros, o volume de metros cúbicos por hectare explorados, os volumes explorados (em m^3) por classe de valor. A madeira, neste questionário foi classificada apenas por classe de valor¹³.

Para a análise dos dados, optou-se por classificar as observações em dois tipos:

- Madeiras que exploram a floresta (n=29, 34,5% da amostra) - Estas madeiras possuem áreas de onde retiram a madeira. Pagam, então os custos de exploração diretamente e pode saber o volume explorado por hectare (Questões 7 a 13).
- Madeiras que não exploram a floresta (n=55, 65,5% da amostra)- Estas madeiras compram a madeira de terceiros¹⁴. No custo de aquisição da madeira estão incluídos então os custos de extração da madeira.

Esta primeira separação já mostra que a maioria das madeiras analisadas (65,5%) opta por não possuir áreas próprias de coleta. Esta informação já parece ser um indicador da preferência das madeiras por estratégias de exploração que evitem a necessidade da elaboração de planos de manejo por parte dos madeiros. Os eventuais custos da elaboração destes planos, caso hajam, ficam a cargo do proprietários das áreas exploradas. Este dado pode também ser um indicador da atividade ilegal. Os madeiros que compram madeira de terceiros, não têm porque bancar os custos de aquisição de áreas e de elaboração de planos de manejo. O papel

¹³No questionário as classes de madeira, estão identificadas como nobre (alto valor, classe k1), vermelha (médio valor, classe k2) e branca (baixo valor, classe k3).

¹⁴Os madeiros referenciam esta madeira como "posta no pátio".

Tabela 15: Tempo de Operação das Madeireiras(anos)

Classe	Observações	Média	Mediana	σ
Sem Extração	54	7,9	7,0	7,0
Com Extração	29	13,0	13,0	7,0
Todas	83	9,9	9,0	7,0

Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 4.

de “esquentar” as ATPF’s ficaria a cargo dos toreiros. Isto, porém, não pode ser afirmado a partir dos dados levantados no questionário.

Tempo de Operação

As empresas que não têm extração (n=54) têm uma idade média de 7,9 anos e as empresas que têm extração (n=29) têm média de 13 anos. Os valores das médias mostram uma idade menor para empresas sem extração. Olhando os gráficos de frequência desta variável é possível verificar que há uma grande diferença entre as empresas que têm extração (Figura 10) e as que não têm extração (Figura 9). Sem considerar a existência de áreas de extração (i.e. para o total dos casos válidos de madeireiras amostradas, n=83) vê-se que o número de madeireiras com 10 anos ou mais é de 40% (Figura 8). O número de madeireiras, neste caso, diminui com os anos de operação. As empresas madeireiras que não têm áreas de extração (Figura 9) apresentam uma distribuição similar ao total das observações válidas. As madeireiras com 10 anos ou mais de operação, neste caso, representam 29% do total de observações. Já as madeireiras com áreas de extração (Figura 9) têm, na faixa de 10 anos ou mais de operação, 68% do total de observações da classe.

Isto implica que as madeireiras que extraem madeira de áreas próprias ou alugadas têm maior tempo de operação, sendo que as madeireiras sem áreas de extração

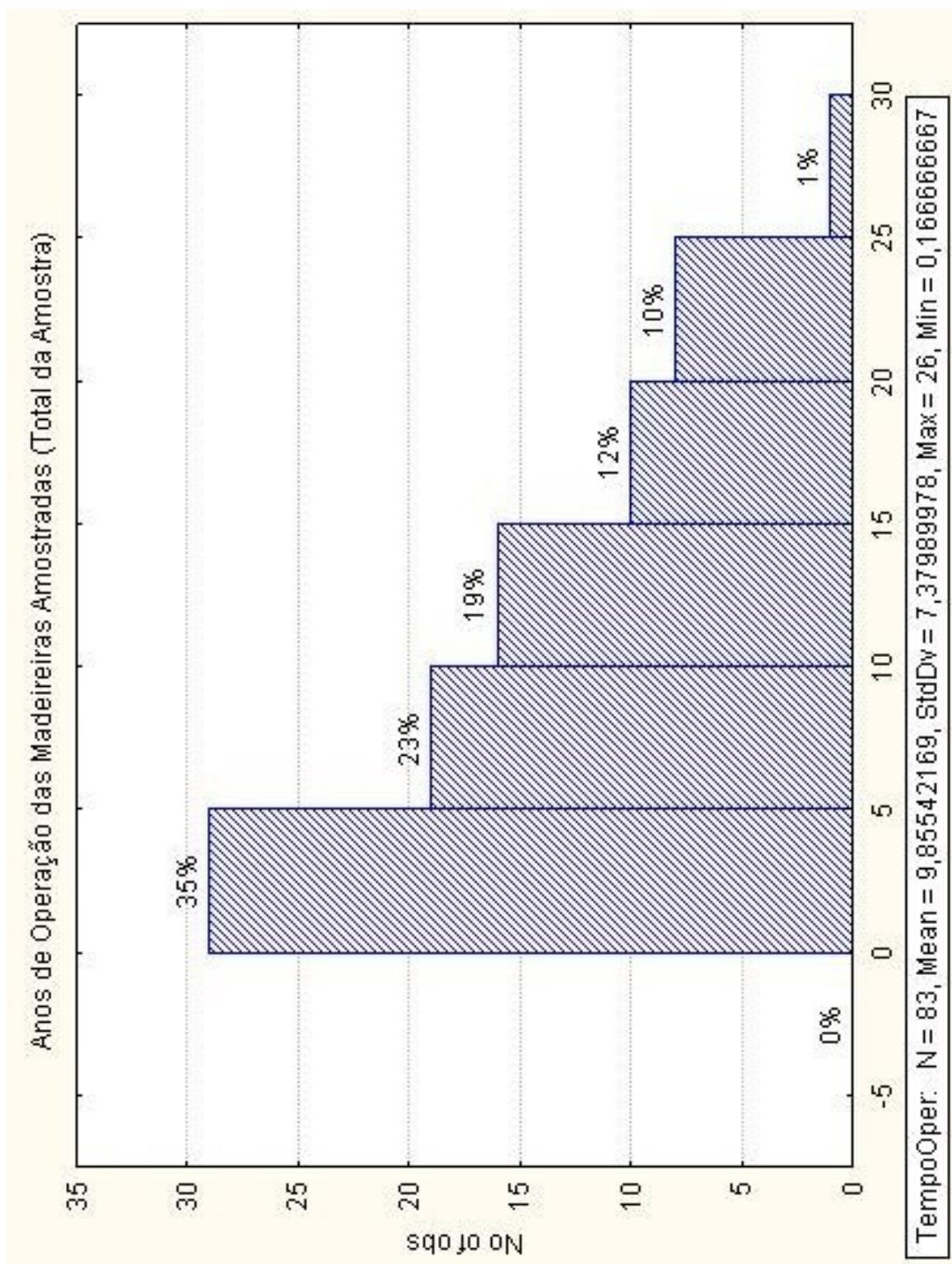


Figura 8: Anos Operação das Madeireiras Amostradas (Total da Amostra)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 4.

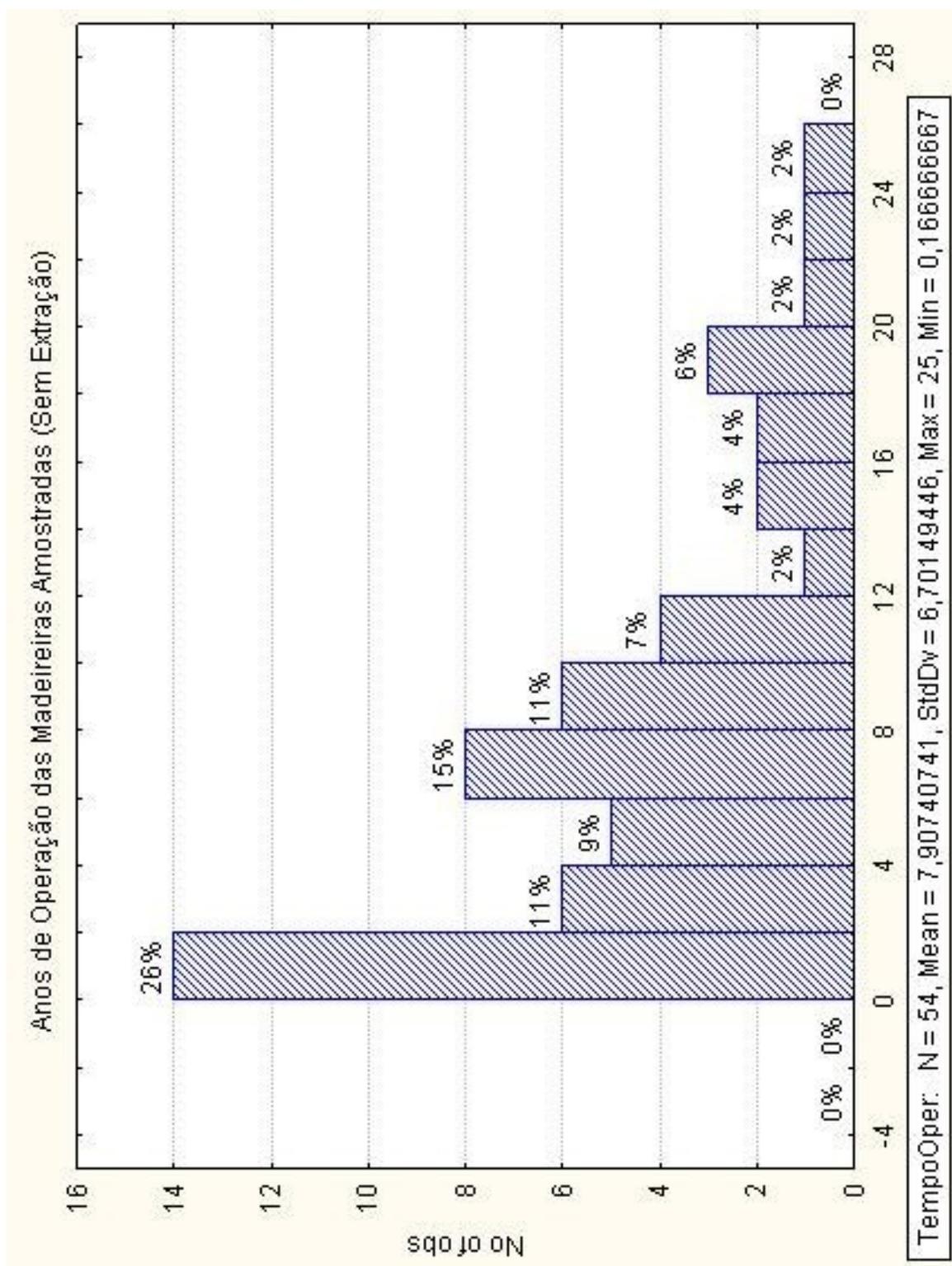


Figura 9: Anos Operação das Madeireiras Amostradas (Sem Extração)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 4.

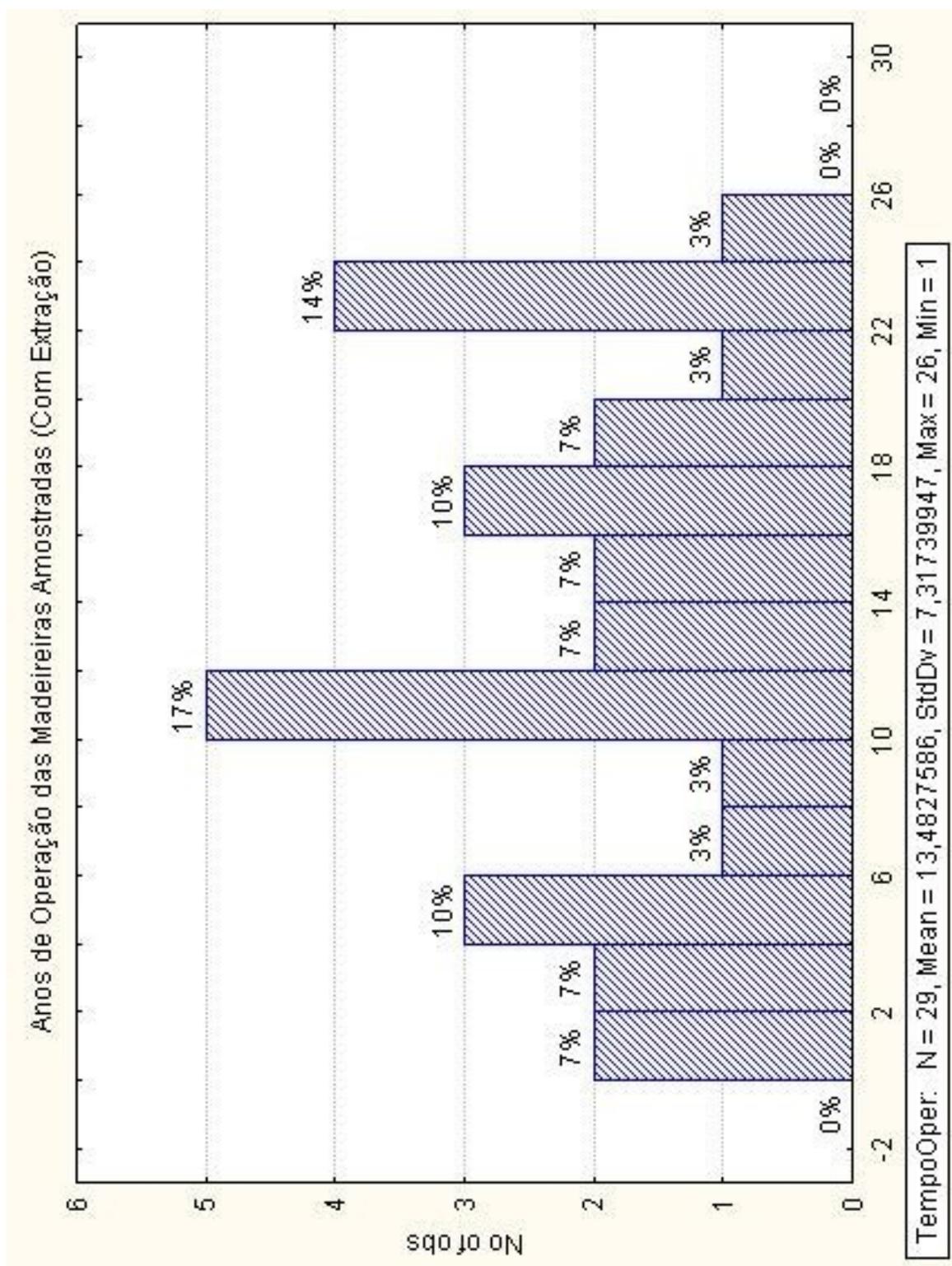


Figura 10: Anos Operação das Madeireiras Amostradas(Com Extração)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 4.

Tabela 16: Volume de Toras Utilizado em 2002 (m^3)

	Observações	Média	Mediana	σ
Com Extração	26	8.507	5.750	8.905
Sem Extração	25	4.793,2	2.500	7.497
Todas	51	6.686,5	4.000	8.375

Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 15.

(que são a maioria) tem menor tempo de operação. Cerca 71% das madeireiras sem áreas de extração têm menos de 10 anos de operação, sendo que, 37% das madeireiras desta classe têm até 4 anos de operação. As madeireiras mais novas não têm, em sua maioria, áreas de extração. Este fato pode indicar uma preferência, para as madeireiras mais novas, por estratégias de extração predatórias ou que as madeireiras que não têm áreas de extração sobrevivem menos tempo no negócio.

Volume de Toras utilizado em 2002

Quanto ao volume de toras utilizado em 2002 (questão 15), as madeireiras (n=51) serraram em média $8.507m^3$ de toras (mediana $5.750m^3$). Para o total das madeireiras (n=51) 53% das observações (Figura 11) são madeireiras que serram até $5.000m^3$. Cerca de 39% das observações situam-se entre 5.000 e $20.000m^3$ de toras e os outros 8% estão acima de $25.000m^3$.

Quando são analisadas as empresas sem extração (Figura 12), 64% delas utilizaram até $5.000m^3$ de tora. Outros 32% ficaram na faixa de 5.000 a $10.000 m^3$ e apenas uma empresa situou-se acima de $35.000 m^3$. Já para as empresas que possuem extração (Figura 13), há uma distribuição maior de observações nas faixas de produção mais altas. Um total de 47% das observações situam-se na faixa entre 5.000 e $20.000m^3$ e outros 12% situam-se na faixa entre 25.000 e $35.000m^3$.

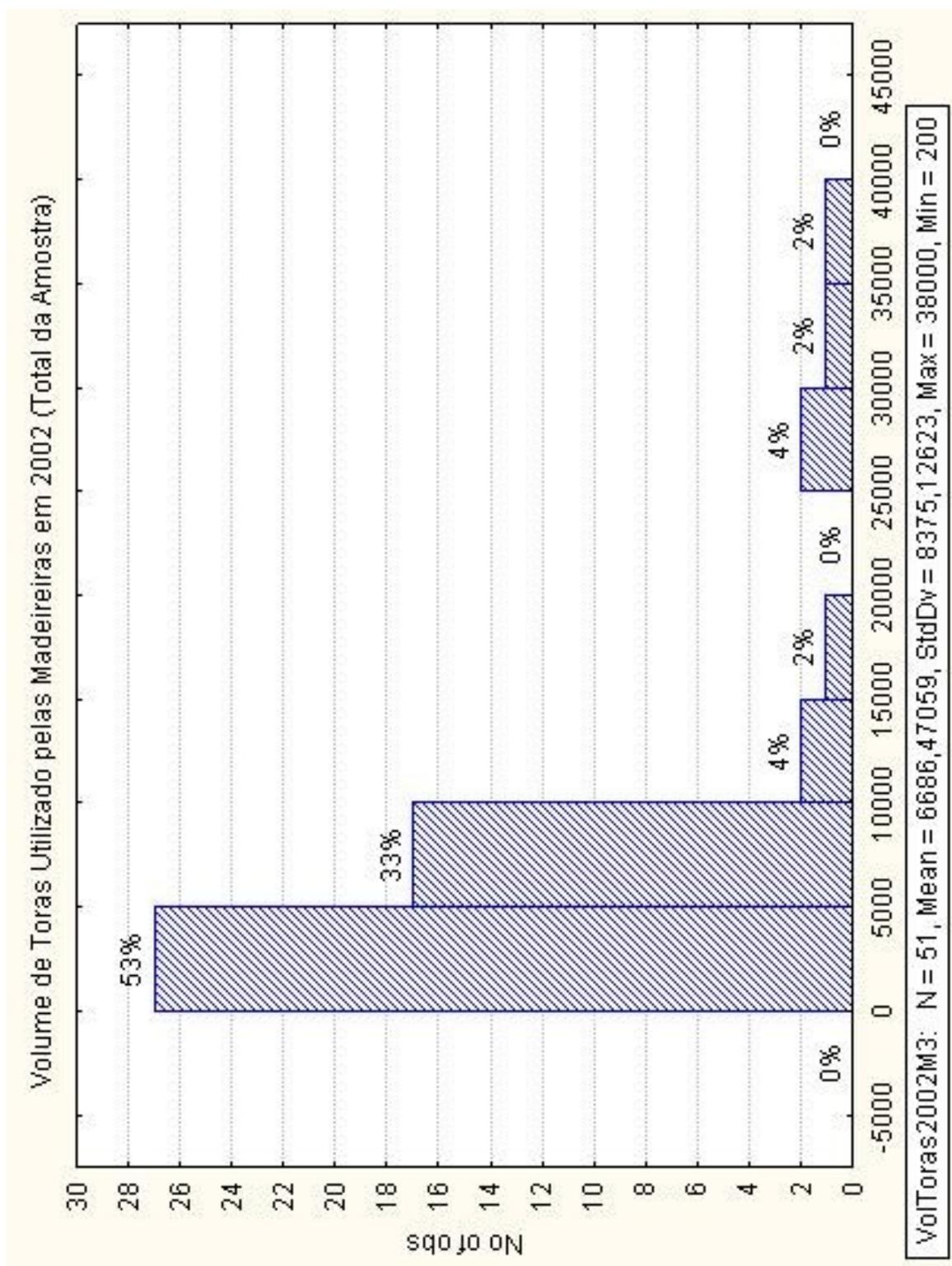


Figura 11: Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Total da Amostra)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 15.

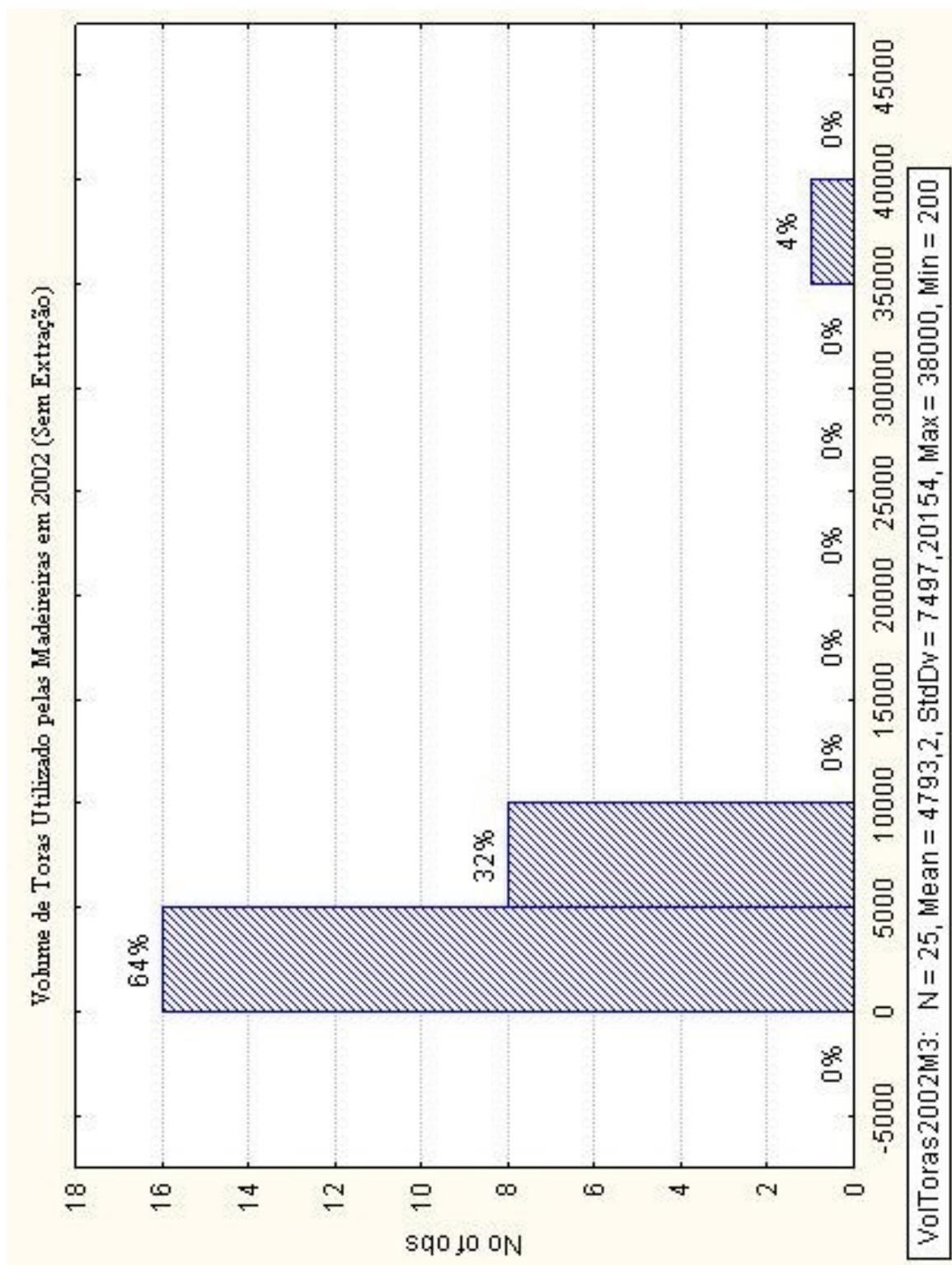


Figura 12: Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Sem Extração)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 15.

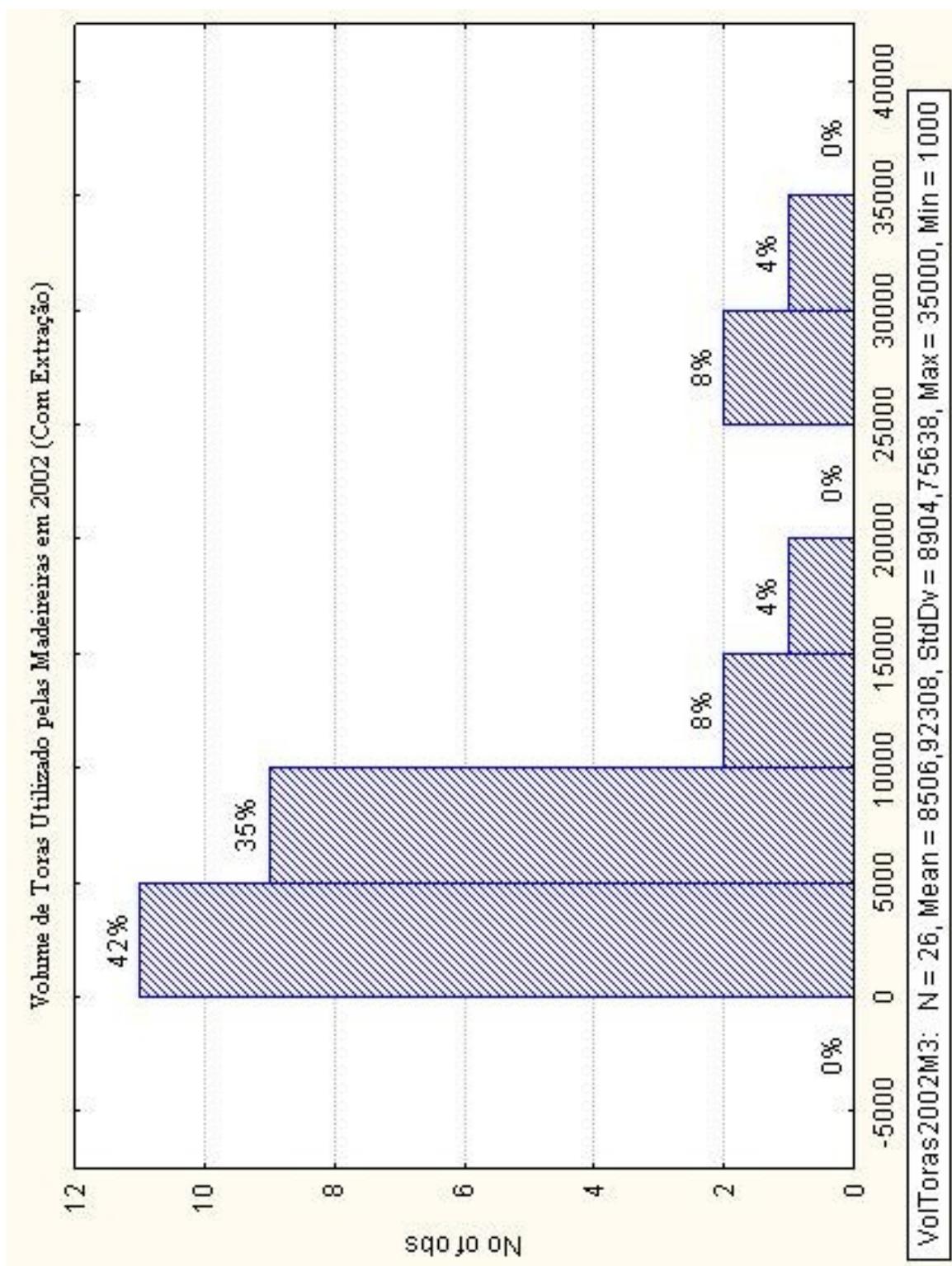


Figura 13: Volume de Toras Utilizado Pelas Madeireiras em 2002 (Com Extração)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 15.

Isto aponta novamente para o fato de que uma parte significativa das madeireiras que têm extração (59% das observações) têm volumes de produção maior. Madeireiras que têm extração têm então maior capacidade produção. Já as madeireiras que não extraem diretamente a madeira da floresta têm, na maior parte dos casos observados, uma capacidade de produção menor. Isto implica que madeireiras sem extração têm, em geral valores menores de capital.

Produção das Madeireiras

Foi perguntado o volume de produção anual (em m^3) para os seguintes produtos:

- Madeira em tora;
- Serrado;
- Compensado;
- Laminado;

A maioria das madeireiras ($n=45$) produz madeira serrada (Tabela 17). As médias das madeireiras com e sem extração divergem significativamente apenas para a variáveis tora ($p=0,051053$) e não divergem significativamente para as variáveis serrado, compensado e laminado ¹⁵. Pode-se afirmar, portanto, que a produção de toras é significativamente dependente do fato do madeireiro executar ou não a extração.

¹⁵Foi aplicado o teste t de Student para as variáveis Tora ($p=0,051053$), Serrado($p=0,289966$), Compensado ($p=0,943537$) e Laminado ($0,246170$). Apesar da divergência entre as médias da variável serrado, os níveis de p muito altos aumentam a possibilidade da ocorrência de erros do tipo 1, o que diminui a possibilidade de se testar a hipótese com segurança)

Tabela 17: Produção das Madeireiras Amostradas em m^3 por Classe e Produto (2002)

Classe/Produto	Observações	Média	Mediana	σ
Total				
Tora	8	4.496,25	3.745,0	3.810,7
Serrado	45	10.220,67	2.600,0	45.815,4
Compensado	4	10.750,00	7.500,0	8.855,3
Laminado	11	38.473,45	4.000,0	10.3649,6
Sem Extração				
Tora	4	1.985,00	1.750,0	899,39
Serrado	23	3.076,09	2.000,0	3.010,17
Compensado	3	11.000,00	5.000,0	10.828,20
Laminado	6	4.001,33	4.000,0	2.402,13
Com Extração				
Tora	4	7.007,50	5.390,0	4.032,0
Serrado	22	17.690,00	2.800,0	65.377,2
Compensado	1	10.000,00	10.000,0	-
Laminado	5	7.9840,00	13.000,0	15.1424,7

Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 5.

Tanto os madeireiros que têm extração quanto os que não têm extração preferem, em sua maioria a produção de serrado. Há um caso de uma que afirmou produzir $310.000m^3$ de serrado e $350.000m^3$ de laminado. A maioria das madeireiras, porém, tem a produção situada na faixa até $10.000m^3$ (Figura: 14) . Apenas seis observações (somando todas os tipos de produto)situam-se na faixa acima de $10.000m^3$. As madeireiras que produzem serrado e têm uma escala de produção até $5.000m^3$ são a maioria dos casos observados.

Custo das Madeireiras

Foram levantados nos questionários os custos para as madeireiras no ano de 2002. Os seguintes custos foram levantados:

- *Custo de Extração* ($R\$/m^3_{tora}$) - O custo de extração das madeireiras para

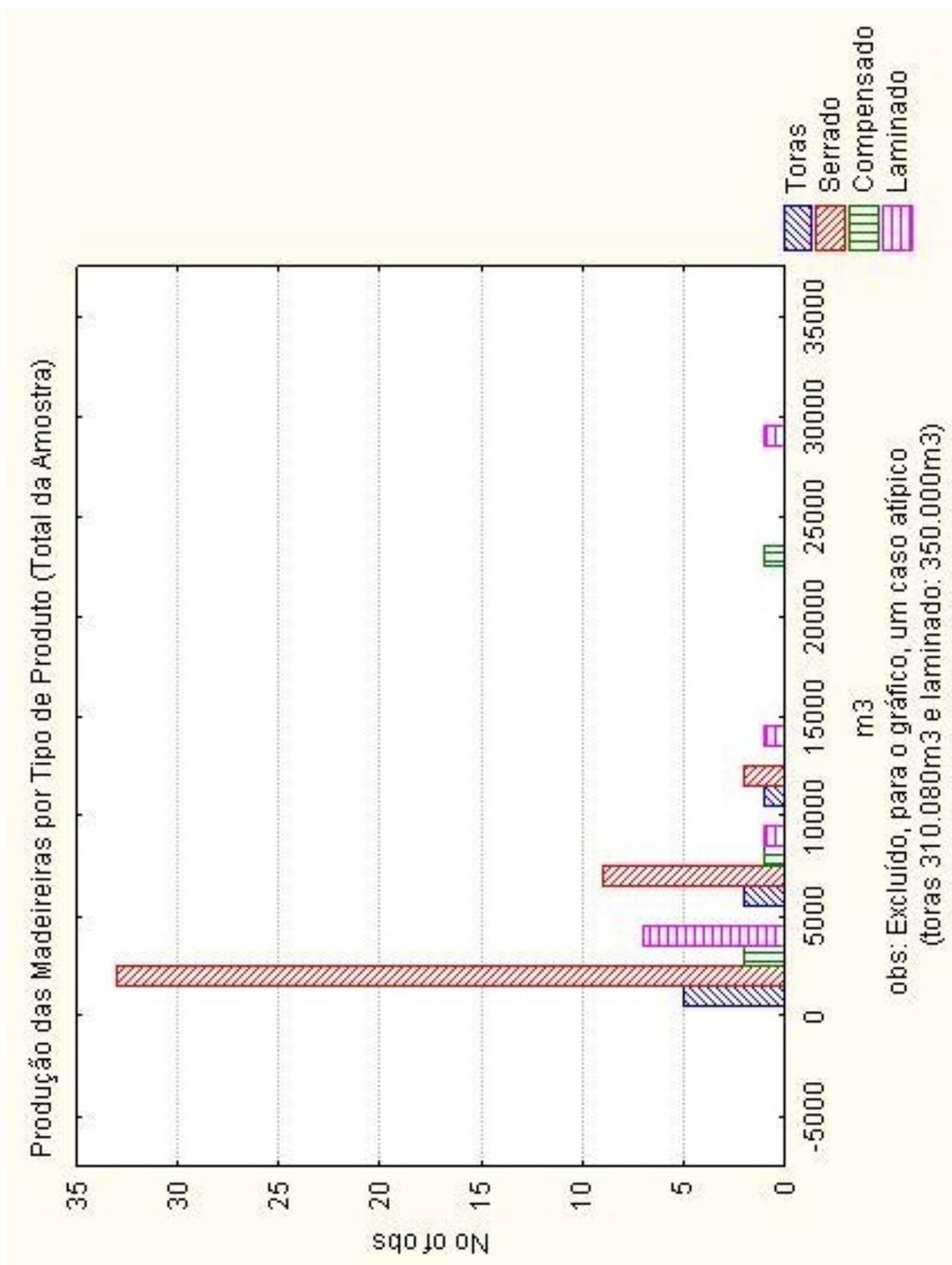


Figura 14: Produção das madeiras por tipo de produto (Total da Amostra)
 Fonte: Pesquisa de Campo - Questão 5.

Tabela 18: Custos das Madeiras - Total da Amostra (R\$)

Distância ou Custo	Observações	Média	Mediana	σ
DistTransp (km)	77	109,38	87,50	79,33
DistAsfalto (km)	65	26,86	0,00	52,76
DistCidadeSerr (km)	75	2,07	0,00	3,45
CustoNobre (R\$/ $m^3_{tóra}$)	38	227,76	180,00	177,07
CustoVermelha (R\$/ $m^3_{tóra}$)	45	140,39	90,00	172,48
CustoBranca (R\$/ $m^3_{tóra}$)	59	81,69	70,00	61,40
CustoSerr (R\$/ $m^3_{serrado}$)	66	115,45	52,50	125,60
CustoLamin (R\$/ $m^3_{serrado}$)	4	104,58	129,00	75,41
FolhaVerão (R\$)	81	23.632,52	14.500,00	31.754,09
FolhaInverno (R\$)	63	24.177,68	13.000,00	33.226,94

Fonte: Pesquisa de Campo.

aquelas que extraem a madeira da mata;

- *Custo de Transporte* (R\$/ $m^3_{tóra} \cdot km^{-1}$) - O custo de transporte da madeira até a serraria;
- *Custos de Aquisição da Madeira* (R\$/ $m^3_{tóra}$)
 - *Custo da Madeira Nobre* - Custo de aquisição da madeira nobre (classe k1);
 - *Custo da Madeira Vermelha* - Custo de aquisição da madeira vermelha (classe k2);
 - *Custo da Madeira Branca* - Custo de aquisição da madeira branca (classe k3);
- *Valor da Folha: Verão e Inverno* (R\$) - O valor da folha de pagamento das serrarias no verão e no inverno.

Tabela 19: Custos das Madeireiras - Sem Extração (R\$)

Distância ou Custo	Observações	Média	Mediana	σ
DistTransp (km)	48	99,64	80,00	83,77
DistAsfalto (km)	44	24,16	-	56,68
CustoNobre (R\$/ $m^3_{tóra}$)	23	260,43	180,00	221,22
CustoVermelha (R\$/ $m^3_{tóra}$)	31	158,71	85,00	203,47
CustoBranca (R\$/ $m^3_{tóra}$)	43	90,00	70,00	67,96
CustoSerr (R\$/ $m^3_{serrado}$)	44	123,92	52,50	136,59
CustoLamin (R\$/ $m^3_{serrado}$)	3	106,77	160,00	92,20
FolhaVerao (R\$)	52	20.018,46	9.610,00	29.537,35
FolhaInverno (R\$)	40	23.304,50	13.000,00	33.267,34

Fonte: Pesquisa de Campo.

Tabela 20: Custos das Madeireiras - Com Extração (R\$)

Distância ou Custo	Observações	Média	Mediana	σ
DistTransp(km)	29	125,52	100,00	69,77
DistAsfalto(km)	21	32,52	15,00	44,17
CustoExtracao (R\$/ $m^3_{tóra}$)	20	53,13	40,00	42,43
CustoTransp (R\$/ $m^3_{tóra} \cdot km - 1$)	23	32,72	30,00	14,20
CustoNobre (R\$/ $m^3_{tóra}$)	15	177,67	180,00	39,05
CustoVermelha (R\$/ $m^3_{tóra}$)	14	99,82	100,00	50,71
CustoBranca (R\$/ $m^3_{tóra}$)	16	59,38	67,50	30,21
CustoSerr(R\$/ $m^3_{serrado}$)	22	98,52	55,00	100,89
CustoLamin (R\$/ $m^3_{serrado}$)	1	98,00	98,00	
FolhaVerao (R\$)	29	30.112,90	17.500,00	34.986,48
FolhaInverno(R\$)	23	25.696,26	12.000,00	33.847,50

Fonte: Pesquisa de Campo.

O custo de extração das madeireiras teve média de R\$ 53,13 por metro cúbico de tora. Os custos de Transporte tiveram média de 32,72 R\$ / m^3 de tora (Tabela 20). Estes custos estão associados apenas às madeireiras que têm extração.

Os custos de aquisição da madeira foram perguntados tanto para os madeireiros que possuem extração quanto para os que não possuem extração. Os testes t efetuados para todas as variáveis de custo de aquisição das madeiras (nobre, vermelha e branca) mostraram que as médias não apresentam diferenças significativas. As probabilidades de erro do tipo I são altas para todas as variáveis. Isto implica que não se pode afirmar com segurança que a hipótese de igualdade das médias possa ser aceita. Um aspecto importante é que todos os valores de custo de aquisição da madeira em tora para as madeireiras que não possuem extração são mais altos. Isto provavelmente é derivado do fato que as madeireiras que não possuem extração devem pagar algo mais aos fornecedores de madeira (produtores rurais, toreiros).

Distância da Floresta e Custos de Transporte

A distância média transportada pelas madeireiras é de 109,38 km (Tabela 18). Para as madeireiras que não têm extração esta distância foi de 99,64 km (Tabela 19) para as madeireiras que têm extração a distância média foi de 125,52 km (Tabela 20). Madeireiras com extração, buscam, então madeira em áreas mais distantes que madeireiras sem extração. Isto parece um fato contraditório, mas não é, caso se pense que a madeira fornecida de autorizações de derrubada e de áreas particulares está mais próxima que as áreas grandes ainda disponíveis para que as madeireiras tenham condições de garantir a extração com os volumes adequados para garantir os

Tabela 21: Volumes Explorados por Area - Com Extração (R\$)

Volumes	Observações	Média	Mediana	σ
VolExplor 2002 (m^3)	23	16.695,65	5.300,000	43.443,36
$m^3.ha^{-1}$	18	23,39	25,750	9,67

Fonte: Pesquisa de Campo.

acréscimos de custo que extrair a madeira implica. Os custos de transporte foram levantados apenas para as madeireiras que possuem extração e ficaram com uma média de R\$32,72 m^3 . O custo de transporte por quilômetro (dividindo-se o raio médio de exploração em Km pelo custo de transporte em m^3) é de R\$ 0,26 $m^3.km^{-1}$.

Custo de Serragem e Laminação

Tem-se apenas 4 observações com os custos de laminação. A média do custo de laminação é de R\$ 104,78/ m^3 . O custo de serragem para o total das madeireiras é de R\$ 115,45 (n=66), o custo de serragem para as madeireiras sem extração é de R\$ 123,92 (n=44) e o custo para as madeireiras com extração é de R\$ 98,52 (n=22). Estes valores diferentes de custo podem apontar para uma menor eficiência no processamento para as madeireiras que não possuem extração. Isto se deve ao fato de que as madeireiras que não têm extração têm uma escala menor e seus custos de serragem sejam mais sensíveis à escala de produção.

Intensidade da Exploração de Madeireiras com Áreas Próprias

Um total de 18 madeireiras exploram uma média de 23,39 m^3ha^{-1} (Tabela 21), Estes valores de exploração correspondem a uma intensidade de exploração média (NEPSTAD, 1999).

Preços de Venda - Madeira Serrada

Tabela 22: Preços Médios de Venda da Madeira - Total da Amostra (R\$/m³)

	Exportação	Mercado Interno	Aproveitamento
Total da Amostra			
Nobre	905,12	705,17	238,41
Vermelha	600,67	416,35	191,63
Branca	851,00	347,24	160,05
Sem Extração			
Nobre	1.068,50	650,00	231,11
Vermelha	603,33	385,91	182,36
Branca	904,67	355,00	169,03
Com Extração			
Nobre	671,71	773,08	243,46
Vermelha	596,67	461,00	212,00
Branca	690,00	333,09	138,33

Fonte: Pesquisa de Campo.

Os preços de venda da madeira serrada têm diferenças significativas entre as madeiras exportadas e as madeiras vendidas para o mercado interno para todas as classes de madeira (Tabela 22). Os valores pagos à madeira serrada exportada, para todas as classes de madeira, são maiores que os valores pagos à madeira vendida no mercado interno.

As médias dos preços alcançados para exportação são maiores que para o mercado interno. A variação dos preços de exportação, porém é mais alta que dos preços para o mercado interno, para todos os tipos de madeira (Figura 15). Isto implica que a exportação de madeira, apesar de mais rentável é um negócio com um grau de incerteza maior para os madeireiros que estão produzindo madeira em Rondônia.

Discussão

O primeiro aspecto relevante a discutir do levantamento dos dados de campo é a heterogeneidade da amostra. As variâncias são altas para a maior parte das

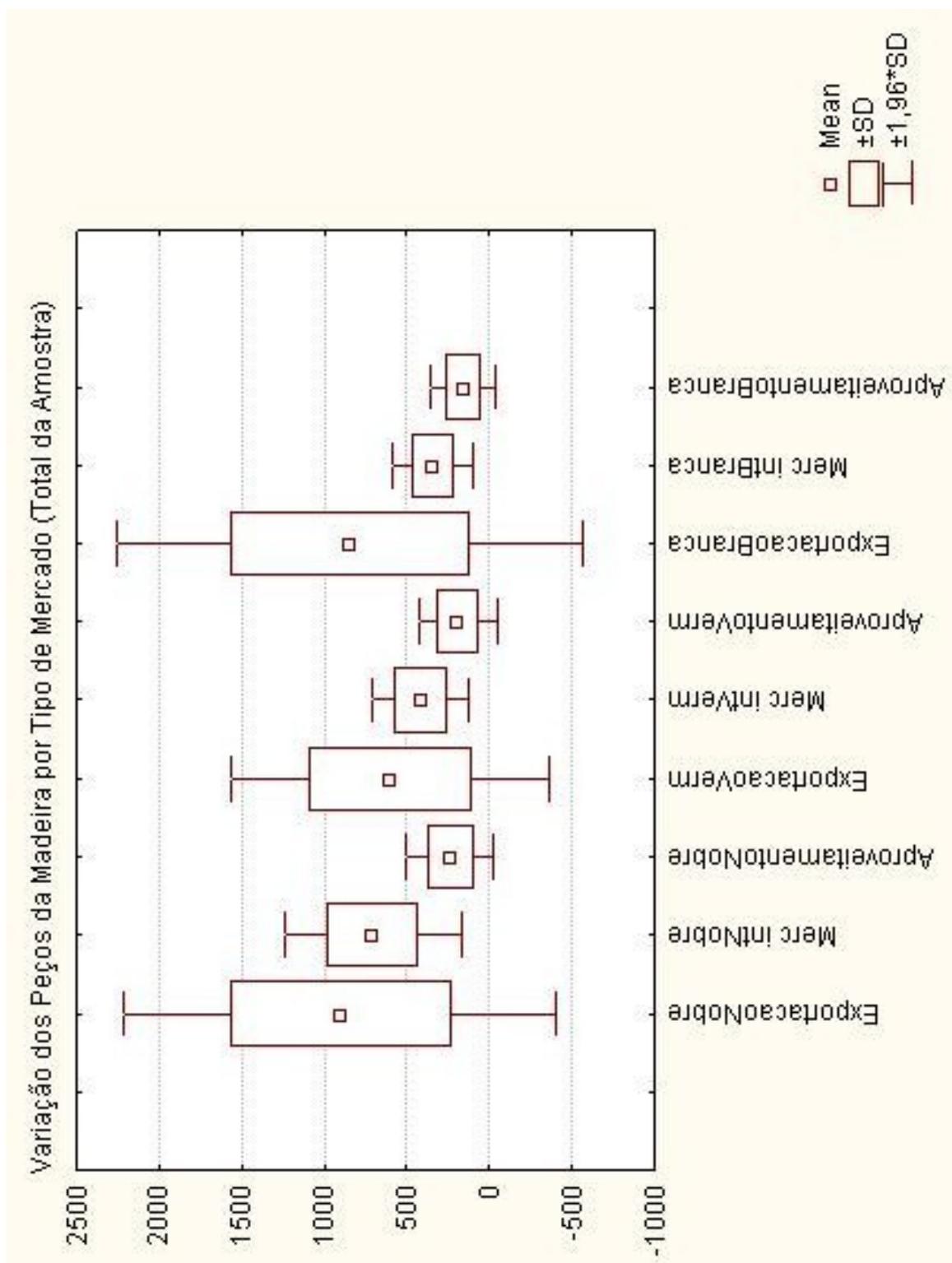


Figura 15: Variação dos Preços da Madeira por tipo e Mercado(Total)
 Fonte: Pesquisa de Campo.

variáveis levantadas. Isto pode ser uma consequência de uma população muito heterogênea, visto que, no setor convivem empresas laminadoras orientadas para produzir insumos industriais para o mercado do Sul/Sudeste, e empresas pequenas que compram madeira de toreiros e/ou exploram áreas de floresta provenientes de autorizações de derrubada ou de pequenos produtores.

As madeireiras de Rondônia são em sua maioria pequenas. Cerca de 53% das madeireiras observadas utilizam até $5.000 m^3_{tóra}.ano^{-1}$. As madeireiras que serram entre 5.000 e $10.000 m^3_{tóra}.ano^{-1}$ representam 33% das observações e as madeireiras de grande porte (acima de $10.000 m^3_{tóra}.ano^{-1}$ são apenas 14% das observações. A produção madeireira em Rondônia ainda é, portanto, efetuada, em sua maior parte por pequenas madeireiras.

As madeireiras têm, em sua maioria (35% das observações válidas), menos de 5 anos de operação. As madeireiras com até 10 anos de operação são 58% do total de observações válidas. As madeireiras que possuem áreas de extração são mais velhas (idade média de 13,5 anos) que as que não têm extração (idade média de 7,9 anos). As madeireiras que têm extração são, então, mais velhas e têm escalas de produção maiores que as que não têm extração.

Se for utilizado um volume médio de exploração de $23,39 m^3.ha^{-1}$, pode-se estimar que a área atingida anualmente pela exploração madeireira. Supondo um uso de madeira em tora de $3.921.000 m^3.ano^{-1}$ (VERISSIMO; ARIMA; LIMA, 2001) pode-se inferir que a área atingida pela exploração madeireira em Rondônia pode chegar a 167.635 ha. Se a maior parte da exploração é predatória, esta seria a área

Tabela 23: Custos e Preços das Madeireiras Pesquisa de Campo vs Literatura (US\$)

Custo	Pesquisa	Literatura**
Exploração - c_1 (US\$/ m^3_{tora})	18,62	7,59
Transporte - c_2 (US\$/ m^3_{tora}/km)	0,09	0,10/2,00/1,30*
Processamento - c_3 (US\$/ $m^3_{serrado}$)	39,95	24,58
Custo da Madeira (US\$/ m^3_{tora})		
- Nobre	78,81	9,38
- Vermelha	48,58	5,21
- Branca	28,27	3,75

Fonte: Pesquisa de Campo.

Notas:

* Os valores referem-se a estrada asfaltada, mata fechada e mata explorada, respectivamente.

** Os valores da literatura foram apurados em (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004).

anualmente afetada pela exploração madeireira no estado.

Resumindo os custos¹⁶ das madeireiras e comparando-os com os valores da literatura, onde é possível, tem-se (Tabela 23) que os custos apurados são maiores para a amostra do que os referenciados na literatura.

Há, portanto, diferenças significativas entre os valores apurados na pesquisa de campo e os da literatura. Estas diferenças provavelmente se devem a vários fatores. Primeiro, os valores apurados pela literatura foram apurados entre 1992 e 1998 (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004, p.39), os custos e preços variaram neste período. Principalmente os custos associados à exploração. Estes custos podem embutir aspectos como uma menor disponibilidade de áreas para exploração e maiores dificuldades na aquisição de madeira provocadas por algum aumento de fiscalização. Os preços significativamente diferentes dos custos da madeira são devi-

¹⁶Os custos levantados pela pesquisa de campo foram convertidos em dólar pelo valor do dólar em 31/12/2003 que era de US\$1,00 = R\$2,89 (Fonte: www.bacen.gov.br)

dos ao fato que a maioria dos madeireiros em Rondônia está comprando a madeira posta no pátio, estes custos, então, embutem os pagamentos aos produtores e aos toreiros pela madeira extraída da floresta. A menor disponibilidade de áreas para exploração também pode ter provocado um aumento dos preços da madeira.

Os preços da madeira para cada classe de valor são os seguintes:

- Exportação

- Madeira de Alto Valor: US\$ 313,19;
- Madeira de Médio Valor: US\$ 207,84;
- Madeira de Baixo Valor US\$ 294,46;

- Mercado Interno

- Madeira de Alto Valor: US\$ 244,00;
- Madeira de Médio Valor: US\$ 144,06;
- Madeira de Baixo Valor US\$ 120,15;

Comparando-se estes preços com os apurados por (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004)¹⁷ pode-se ver que há uma diferenciação entre os preços da madeira destinada ao mercado externo e o preço da madeira destinada ao mercado interno. Os preços da madeira, em dólar são menores para as madeiras vendidas internamente, em relação aos dados citados em (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004), mas são maiores para o mercado externo. Esta diferença de preços pode começar a

¹⁷Alto Valor: US\$ 280,00; Médio Valor: US\$ 239,00; Baixo Valor US\$ 158,00;

funcionar como um atrativo para o setor madeireiro investir em exportação, melhorando as margens de lucro. Estes preços, apesar de sua grande variação apontada na pesquisa podem ampliar a atratividade da exploração madeireira. Principalmente se os controles sobre a exploração predatória continuarem frouxos.

6 *Simulações e Cenários*

Neste capítulo se discute-se as simulações executadas e seus resultados.

Apresenta-se as principais conclusões do estudo.

6.1 **Calibração do Modelo e Planejamento dos Cenários**

A partir dos dados levantados na literatura e dos valores da pesquisa de campo foram construídos os cenários para a simulação. Os dados resultantes da simulação são utilizados como fonte para a compreensão da dinâmica da atividade e são validados com os dados da pesquisa de campo.

Foram implementados dois tipos de agente madeireiro: *Madeira de Grande Porte* (AgLargeMill) e *Madeira de Pequeno Porte* (AgSmallMill). A diferença fundamental entre estes dois tipos de agente é a capacidade de produção anual. As madeiras de grande porte têm uma capacidade de produção, no Modelo, de $65.000 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ e as madeiras de pequeno porte têm uma capacidade de produção de $4.000 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$.

Os valores para a floresta foram os seguintes:

- Classe de Alto Valor - $14,62 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$
- Classe de Médio Valor - $29,81 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$
- Classe de Baixo Valor - $29,90 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$

Não foi implementado o modelo de crescimento da floresta.

A área de exploração foi configurada como um grid de 50x50 células. Cada célula tinha um tamanho de 500 ha^1 . Cada célula de floresta tinha $7.310,0 \text{ m}^3$ de madeira de alto valor (classe k_1), $14.905,0 \text{ m}^3$ de madeira de médio valor (classe k_2) e $14.950,0 \text{ m}^3$ de madeira de baixo valor (classe k_3).

Estas células eram exploradas pelos agentes na simulação. Uma célula, selecionada por um agente, em uma iteração da simulação, não poderia ser selecionada por outro agente. Isto simulava a concorrência dos madeireiros pelo recurso. Isto também permitia que os custos dos madeireiros fossem diferenciados, dependendo da quantidade de células selecionadas e da distância que estas células estavam do pólo madeireiro. A distância do pólo é calculada em linha reta, multiplicando-se a distância da célula ao pólo madeireiro pelo tamanho (em km) da célula. Todas as células foram inicializadas com os mesmos valores de madeira. A floresta, no modelo, era inicialmente homogênea. A atratividade da floresta, então, é dada, inicialmente apenas pela distância da célula até o pólo madeireiro.

Os custos de transporte para cada célula são calculados da seguinte forma:

1. Calcula-se a distância (em km) da célula até o pólo;

¹A área utilizada tem, então um tamanho total de $1.250,00 \text{ ha}$.

2. Calcula-se o custo de transporte em linha reta da célula até o pólo ($c2Mill$);
3. Calcula-se a distância da célula até a estrada mais próxima;
4. Calcula-se o custo de transporte em linha reta da célula até a estrada mais próxima ($c2Road$);
5. Calcula-se o custo da célula de estrada até o pólo ($c2RoadMill$);
6. Se o custo em linha reta for menor que o custo da célula usando a estrada, aplica-se o custo em linha reta;
7. Se o custo em linha reta for maior que o custo da célula usando a estrada, aplica-se o custo de acesso usando a estrada;

Os custos médios de transporte para cada madeireira são apurados os custos de transporte para cada célula ($c2Cell$) e dividindo pelo número de células exploradas pela madeireira. Este custo médio de transporte é utilizado para a seleção das estratégias de exploração da madeireira.

Foram feitos cenários variando os seguintes itens:

- *Grau de Governança* - g . O custo da exploração ilegal de madeira pode tornar esta exploração proibitiva. É importante testar as diversas possibilidades de custo para verificar quanta fiscalização e valores de multas são necessários para diminuir a exploração ilegal.
- *A influência dos preços da madeira* - $p_{j,k,s}$. Estes preços variam no mercado interno e externo por tipo de madeira e variam no mercado externo também

pela taxa de câmbio. Portanto, se o real se desvaloriza isto influencia os preços da madeira para exportação, aumentando a atratividade da atividade exploradora. Embora os preços de exportação da madeira tenham médias mais altas que os preços para o mercado interno, não parece haver diferenciação dos preços por tipo de estratégia.

- *A influência de Políticas de Tarifação* - τ . Foram experimentadas políticas diferenciadas de taxaço para estratégias predatórias e não-predatórias.

6.2 Cenários

6.2.1 Caso Base

Foi feito um cenário base para as simulações. O cenário base têm as seguintes características:

- *Grau de governança* (g)=0. Supõe-se que nenhuma parte da madeira extraída ilegalmente é apreendida;
- *Preços da madeira* ($p_{j,k,s}$) não são diferenciados por tipo de estratégia;
- *Tarifas* (τ) não são diferenciadas por tipo de estratégia de exploração.

Os coeficientes da função objetivo da madeireira foram inicializados com os seguintes valores:

- $\tau = 0,1465$;
- $\phi = 0.4$;

- $c_{1,s,j} = 7.59$;
- $c_{2,s,j} = 0.11$;
- $c_{3,s,j} = 24.58$;
- $c_{4,s,j} = -$;

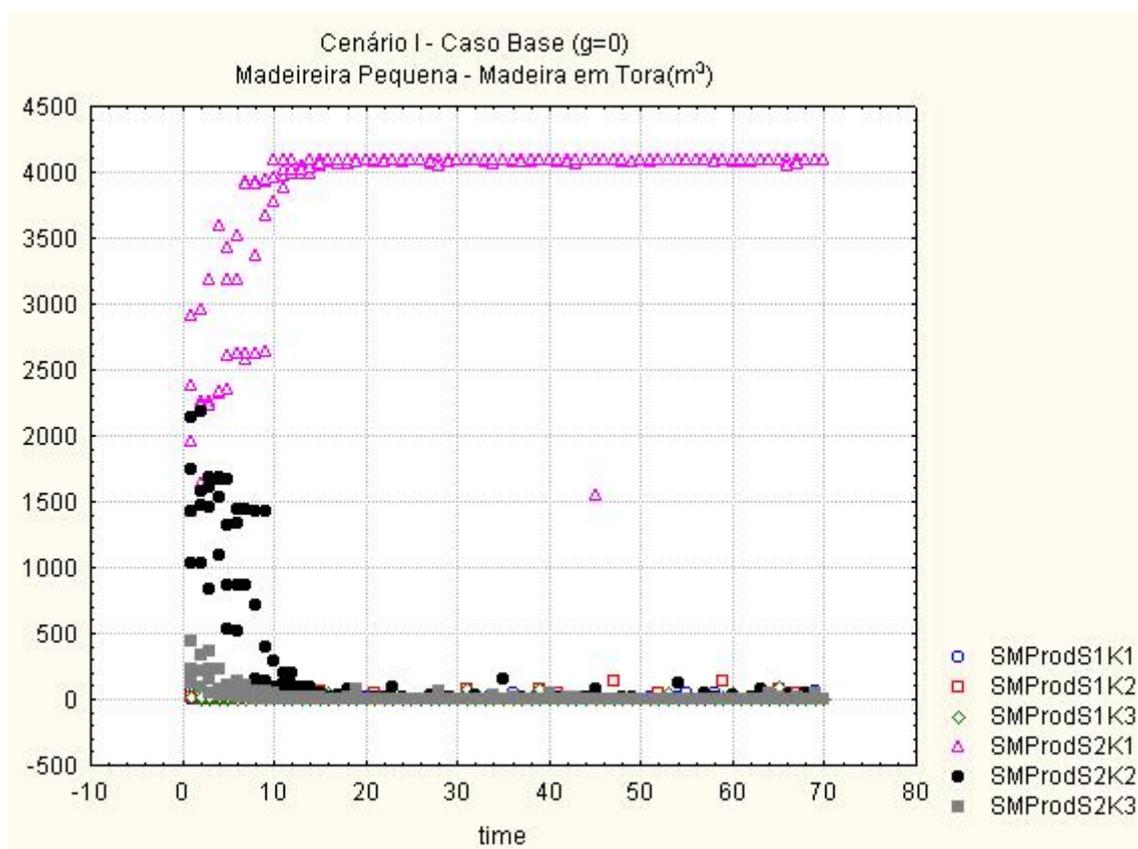
Estes coeficientes seguem os dados da literatura. Tanto (STONE, 1997) quanto (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004) utilizam estes valores no seu modelo para a indústria madeireira. Os custos de transporte foram inicializados com o valor mínimo (custo da estrada asfaltada) referenciados na literatura; estes custos são ajustados de acordo com o algoritmo de correção dos custos de transporte associado às células. Os custos de capital não foram analisados nestas simulações.

Os preços da madeira, para o Caso Base são os de (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2004).

Foram executadas 5 simulações para o Caso Base. Nestas simulações gerou-se um conjunto de arquivos que permite a análise dos resultados dos cenários.

Neste cenário (Figuras 16 e 17), para todas as simulações, a estratégia escolhida é a estratégia predatória (s_2) e a classe escolhida é a madeira de alto valor (k_1). Tendo em vista os mecanismos de aprendizado as madeireiras rapidamente convergem para concentrar as estratégias de coleta na exploração predatória das classes de valores mais altos.

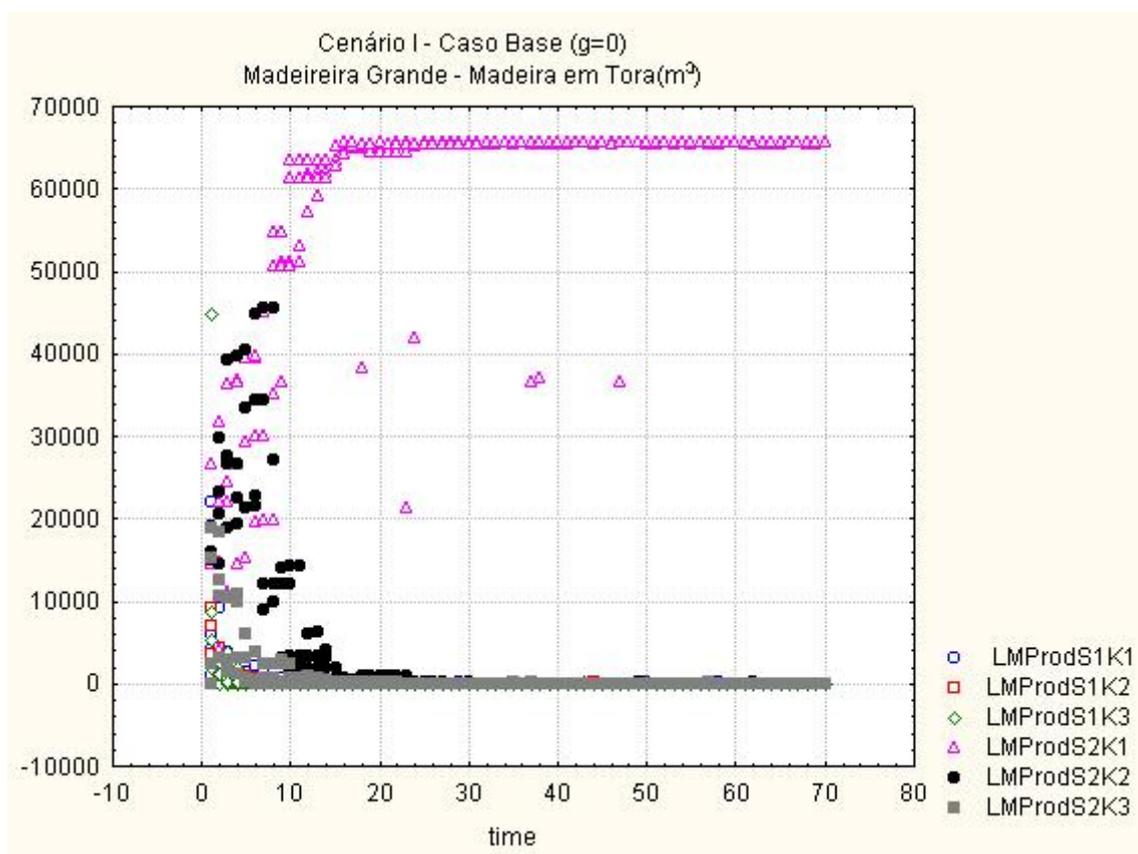
Os lucros (Figuras 18 e 19) para este cenário, diminuem com o tempo e são menos instáveis para as madeireiras de grande porte. A diminuição dos lucros é



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K2 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 16: Cenário I - Caso Base: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeira, estratégia, classe de madeira):

- LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 17: Cenário I - Caso Base: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeiras)

Tabela 24: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário I - Caso Base ($g = 0$)

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	3	0,08	223	0,35
k_2s_1	4	0,10	208	0,33
k_3s_1	3	0,08	234	0,37
k_1s_2	3761	95,51	58438	92,56
k_2s_2	150	3,81	3358	5,32
k_3s_2	17	0,43	674	1,07
Total	3.938,00		63.134,13	

Fonte: Simulação.

resultado do aumento da distância de coleta de madeira.

Baixo grau de governança implica que os madeireiros escolherão uma estratégia predatória e buscarão as árvores de maior valor (95% do total médio extraído). Este resultado é coerente com as observações dos ciclos de exploração madeireira, que tendem a privilegiar inicialmente as madeiras de maior valor. A escolha da classe de madeira de mais alto valor com uma estratégia predatória se deve ao fato de que, na função objetivo usada na seleção das soluções para as estratégias, o custo de transporte considerado era a média dos custos de transporte totais, o que implicava em que células mais próximas com madeira de médio valor eram preterida em relação a células com grande quantidade de madeira de alto valor. Apesar destes problemas do processo de seleção das estratégias, os resultados são consistentes com a literatura e as observações.

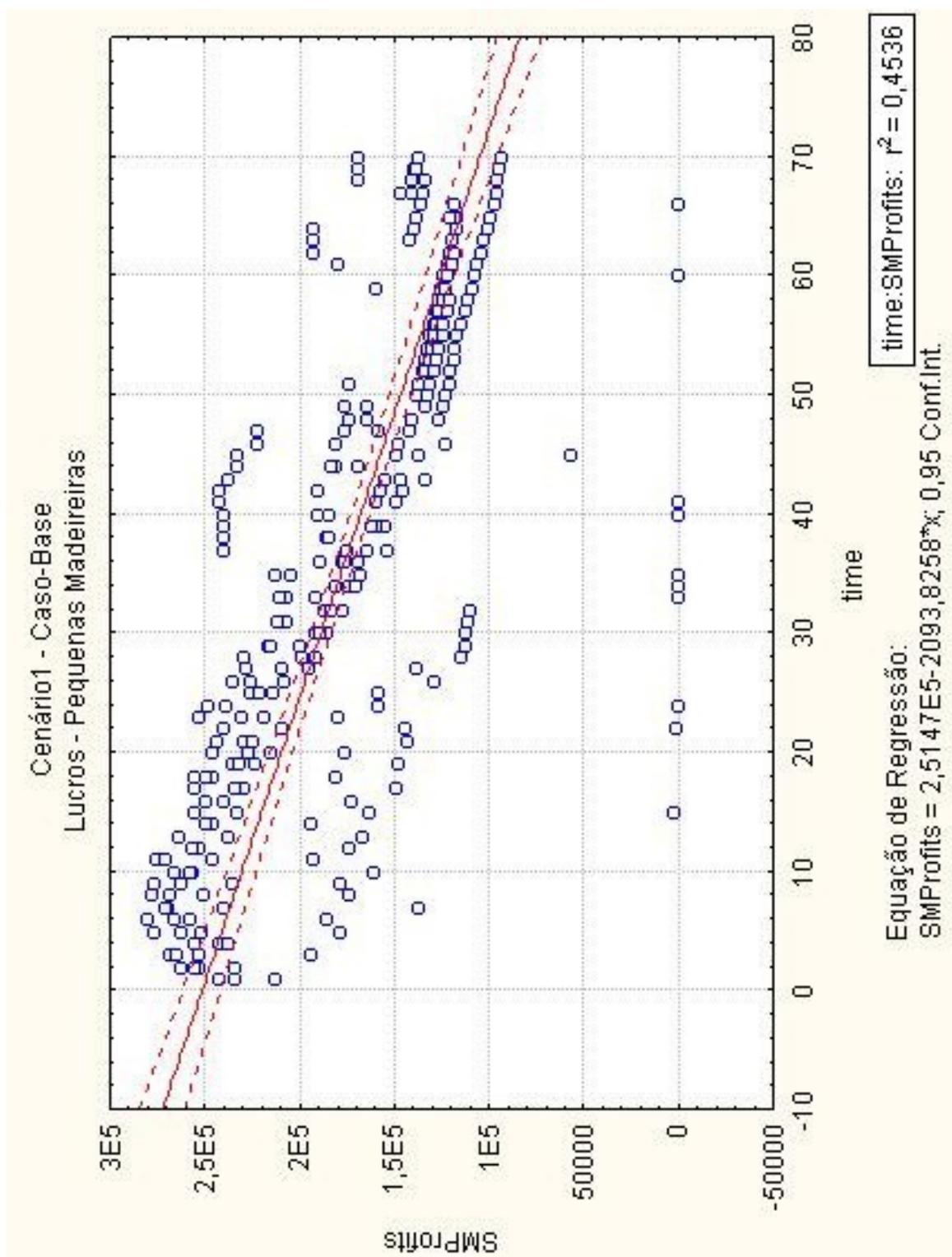


Figura 18: Cenário I - Caso Base: Lucros para a Pequena Madeireira

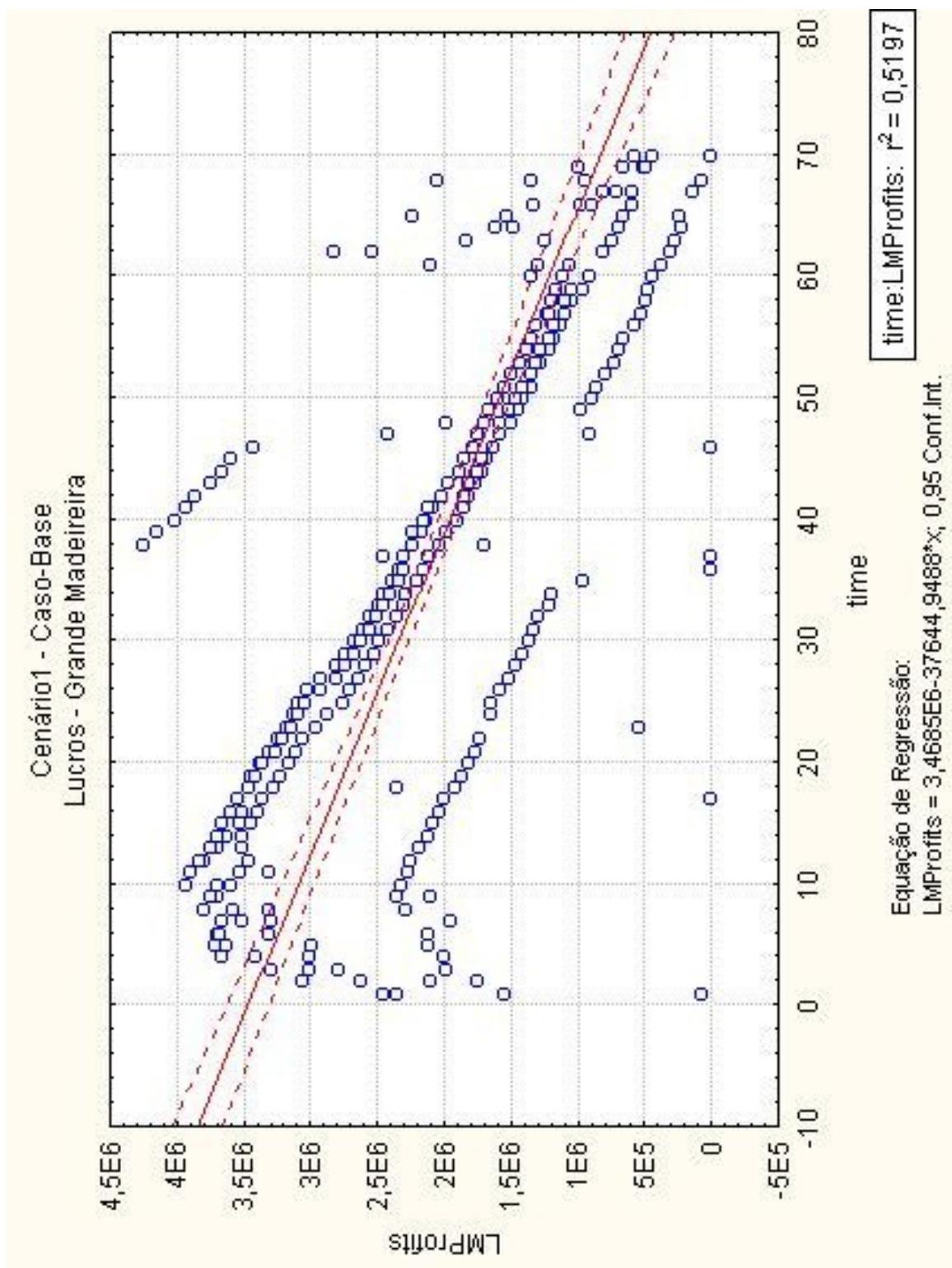


Figura 19: Cenário I - Caso Base: Lucros para a Grande Madeireira

Tabela 25: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário I - Caso Base ($g = 0$)

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	3330,4	84,57	57455,9	91,01
k_2s_1	593,9	15,08	3895,5	6,17
k_3s_1	36,2	0,92	1652,3	2,62
k_1s_2	1,2	0,03	6,1	0,01
k_2s_2	0,6	0,02	1,9	0,00
k_3s_2	1,9	0,05	50,0	0,08
Total	3.964,26		63.061,65	

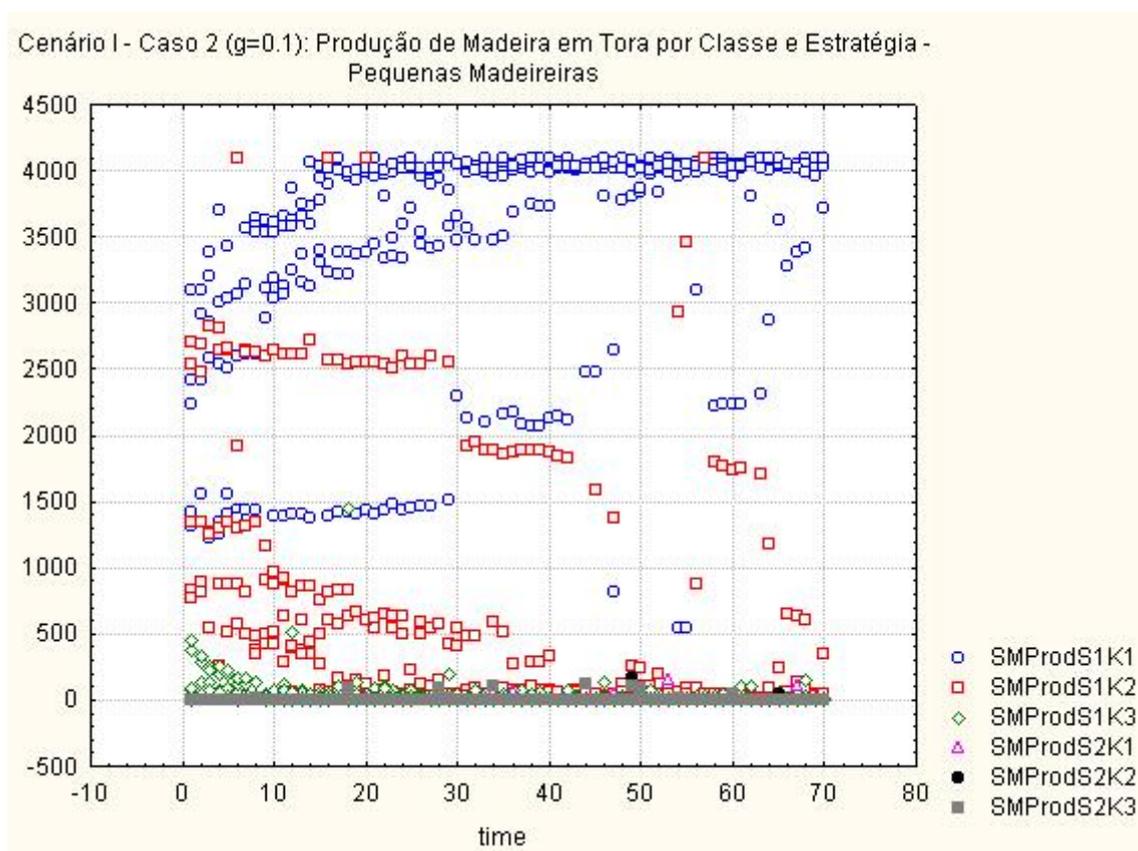
Fonte: Simulação.

6.2.2 Influência da Governança (Cenário I)

O Caso 2, do Cenário I, simulou-se um aumento na capacidade de fiscalização do Estado. Supôs-se uma taxa de apreensão da madeira extraída ilegalmente de 10% ($g = 0,1$).

As estratégias de exploração passam, neste cenário, a ser predominantemente sustentáveis (s_1) (Figuras 20 e 21). Aqui se nota também que um aumento da fiscalização afeta diferentemente as madeiras grandes e as madeiras pequenas. Madeiras grandes tendem a concentrar-se fortemente na exploração de madeira de mais alto valor (classe k_1) já as madeiras pequenas distribuem suas estratégias de exploração entre as classes k_1 e k_2 .

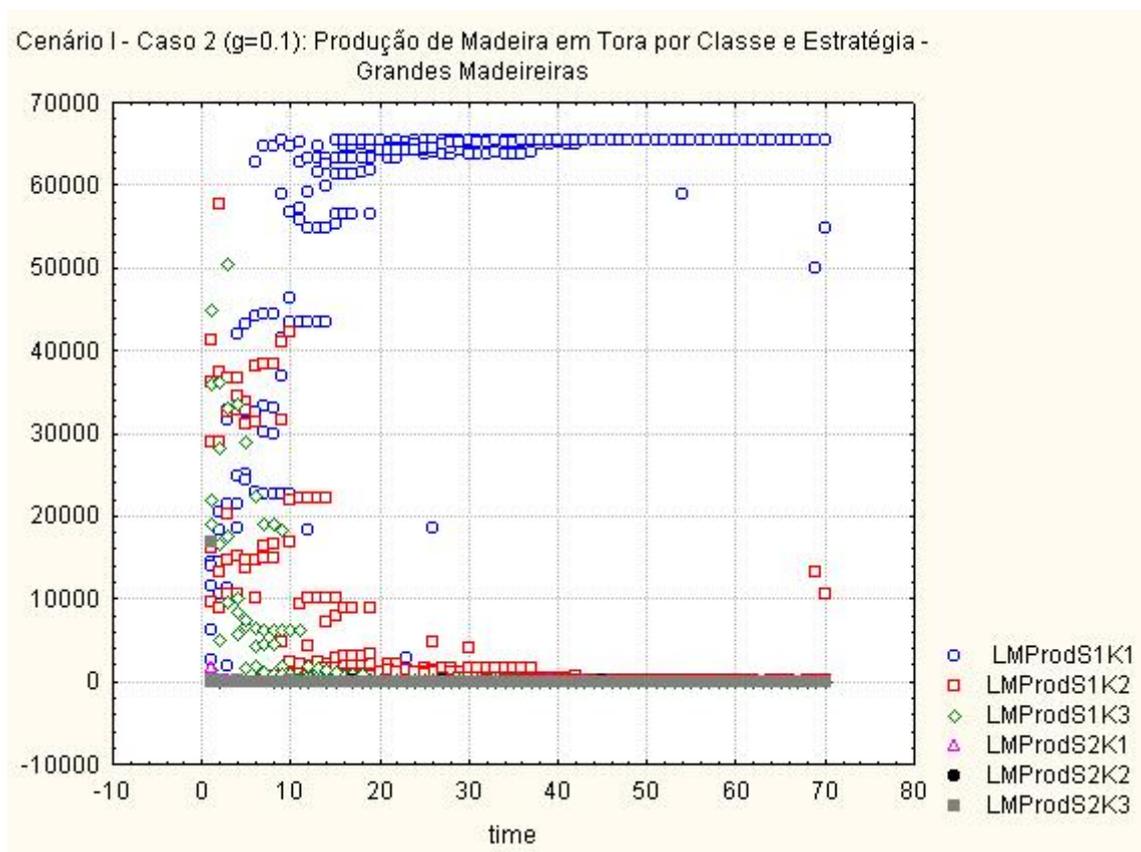
Os lucros (Figuras 22 e 23) para este cenário, também diminuem quando a distância de coleta aumenta.



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K2 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 20: Cenário I - ($g = 0,1$): Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);

LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);

LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);

LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);

LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);

LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 21: Cenário I - ($g = 0,1$): Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grande Madeiras)

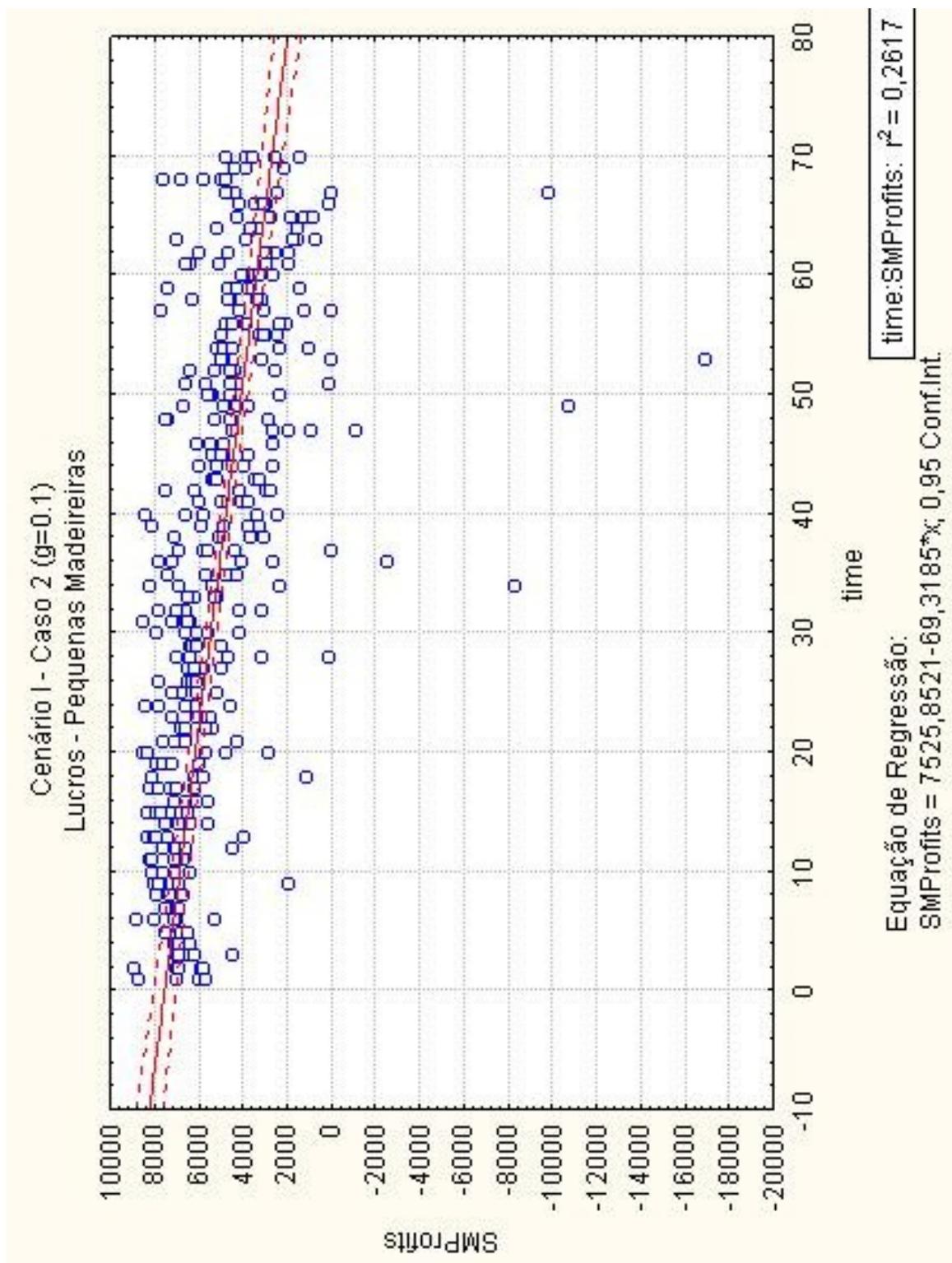


Figura 22: Cenário I - (g = 0.1): Lucros para Pequena Madeireira

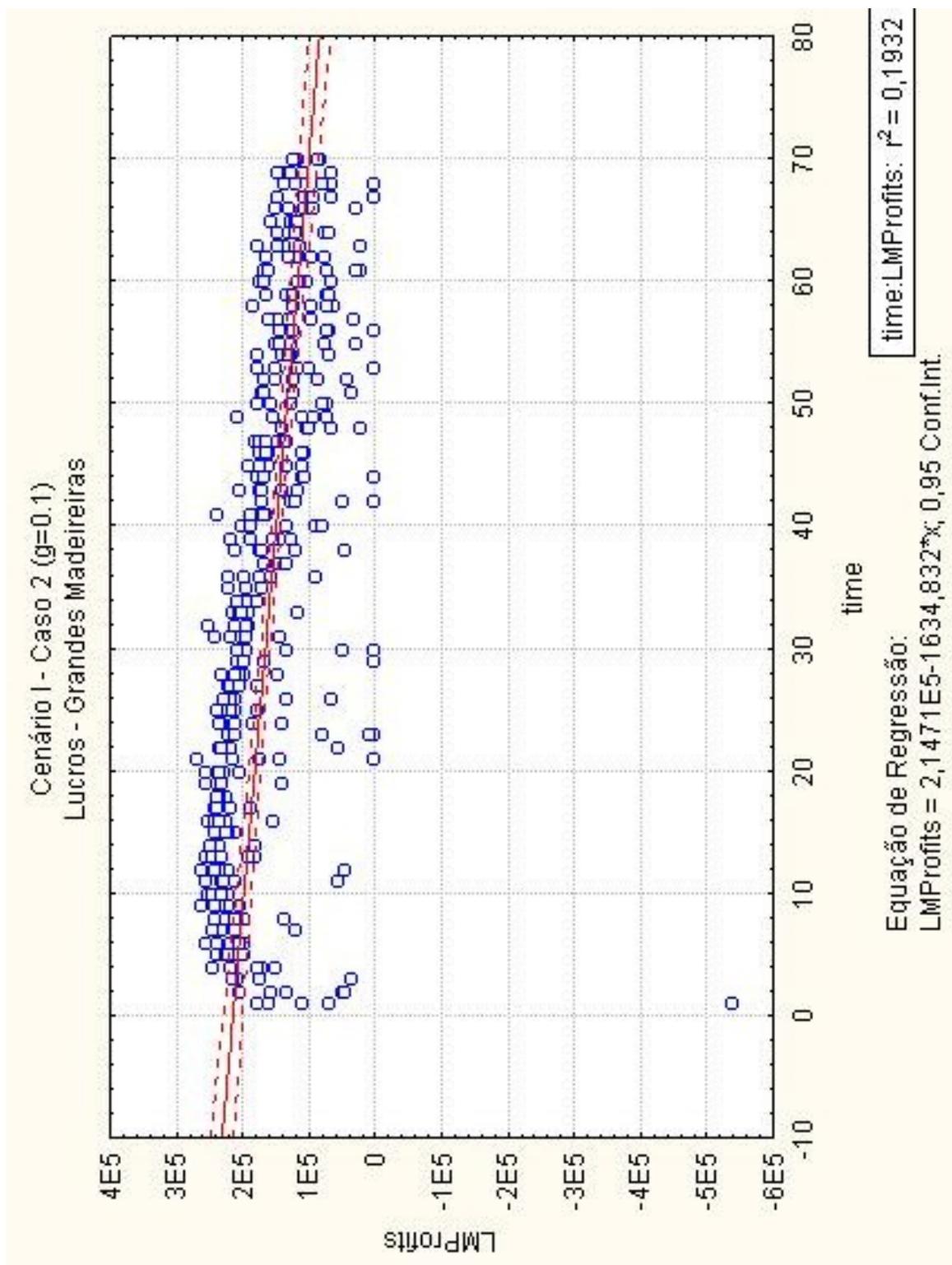


Figura 23: Cenário I - ($g = 0.1$): Lucros para Grande Madeireira

6.2.3 Tarifação Reduzida para Manejo (Cenário II)

Neste cenário buscou-se estudar a influência de diversas estratégias de tributação no comportamento dos madeireiros. Para isso, fez-se uma modificação no modelo computacional para a aplicação de tributos diferenciados por estratégia de coleta. A variável τ pode então assumir dois valores diferentes: τ_{s_1} para a estratégia sustentável e τ_{s_2} para a estratégia predatória. O objetivo aqui é avaliar quanto se precisa modificar os níveis de tributação para que os madeireiros escolham estratégias sustentáveis.

A variável τ foi inicializada, no Caso Base, com o valor de 0,1465 este é o nível de tributação referenciado na literatura citada. É necessário dizer que se supõe que os madeireiros não sonham os tributos.

Em todos os cenários analisados o modelo mostra pouca sensibilidade a variações dos tributos. Aumentos de tributos para estratégias predatórias e diminuição de tributos para estratégias sustentáveis não chegam a produzir uma mudança nas estratégias de exploração dos madeireiros para todos os casos analisados.

Caso 1

Para o Caso 1 estabeleceu-se o valor de $\tau_{s_1} = 0,1465$ e o valor de $\tau_{s_2} = 0,1565$. Isto corresponde à elevação de 1 ponto percentual no nível de tributação da indústria, para aquelas madeireiras que praticam estratégias predatórias.

As madeireiras maiores têm mais sensibilidade a este tipo de política. As Figuras 24 e 25 mostram que as madeireiras grandes, em parte da simulação, escolhem

Tabela 26: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 1

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	7	0,18	148	0,
k_2s_1	3	0,09	358	0,57
k_3s_1	7	0,17	222	0,35
k_1s_2	3.666	93,09	55.459	87,84
k_2s_2	247	6,26	4.436	7,03
k_3s_2	29	0,73	594	0,94
Total	3.958,22		61.216,94	

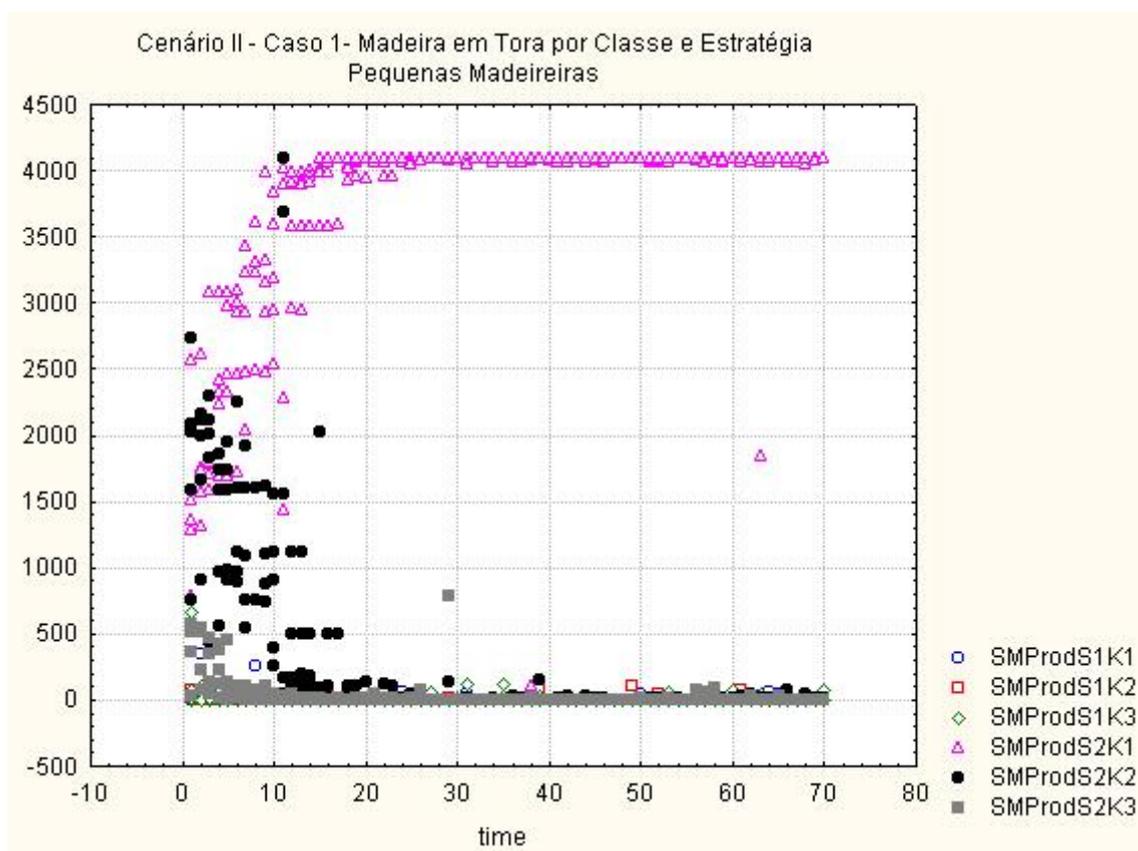
Fonte: Simulação.

estratégias mistas. As madeireiras pequenas (Tabela 26) têm uma média 93,09% de participação da madeira de alto valor coletada na estratégia predatória (s_2). As madeireiras grandes (Tabela 26) apresentam um percentual médio de coleta da madeira de classe k_1 na estratégia s_2 de 87,84.

Os lucros (Figuras 26 e 27) tendem a diminuir quando a distância de exploração aumenta. As grandes madeireiras, apesar de apresentarem maior dispersão em relação aos lucros, têm um caminho mais estável. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que as grandes madeireiras têm uma área maior de exploração, como as células têm o tamanho de 500ha, um aumento ou diminuição de uma célula não tem muito impacto nos lucros. Já as pequenas madeireiras, como têm a uma capacidade de produção muito menor, sofrem mais os efeitos da alteração de custo produzida pela aquisição de novas células.

Caso 2

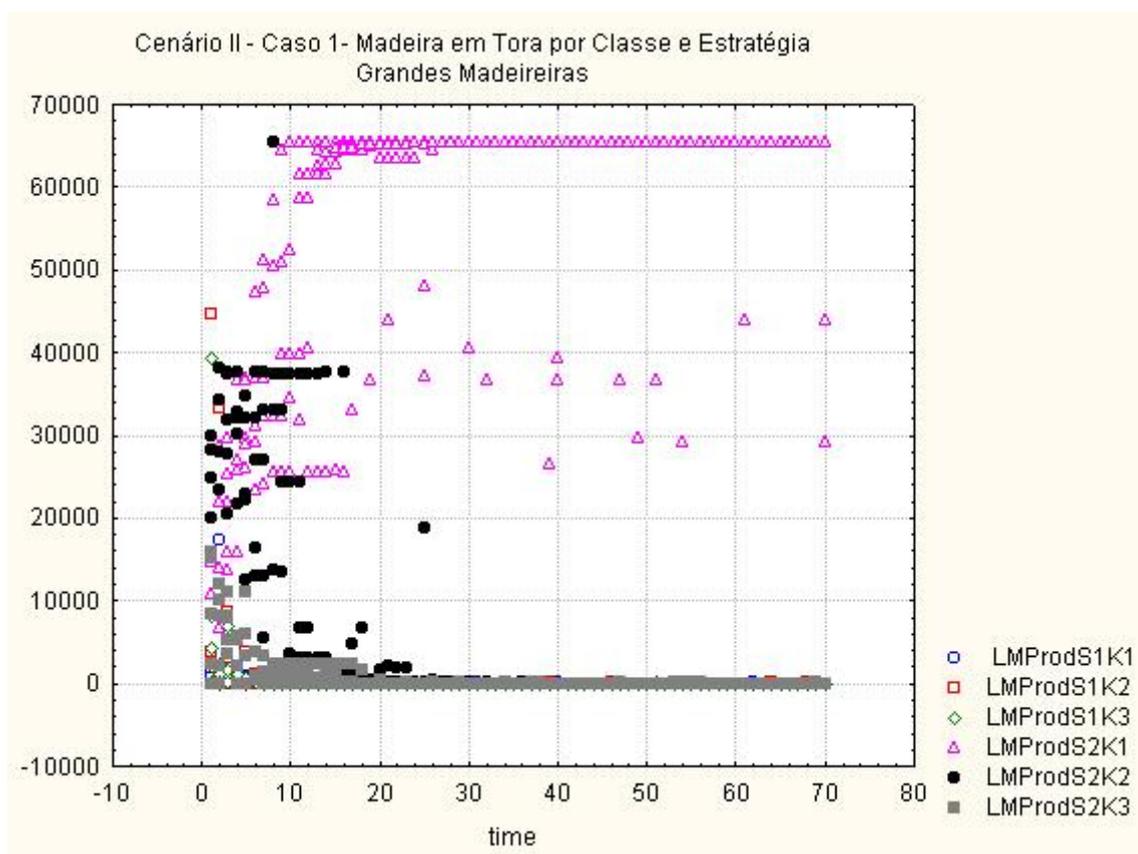
Para o Caso 2 estabeleceu-se o valor de $\tau_{s_1} = 0,1465$ e o valor de $\tau_{s_2} = 0,1665$. Aumentando os níveis de tributação da indústria, para aquelas madeireiras que



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K2 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 24: Cenário II - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeira, estratégia, classe de madeira):

- LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 25: Cenário II - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)

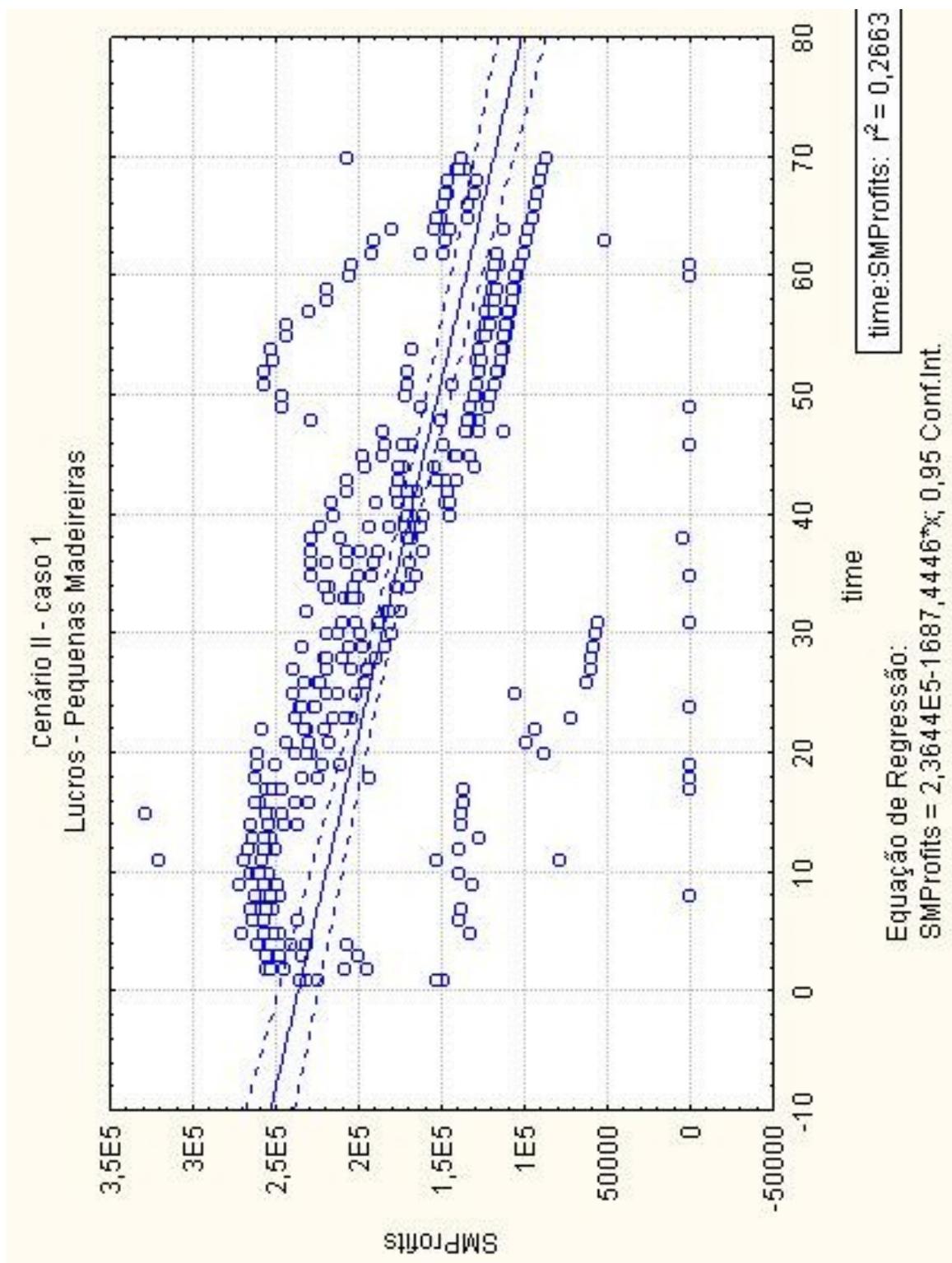


Figura 26: Cenário II - Caso 1: Lucros para Pequena Madeireira

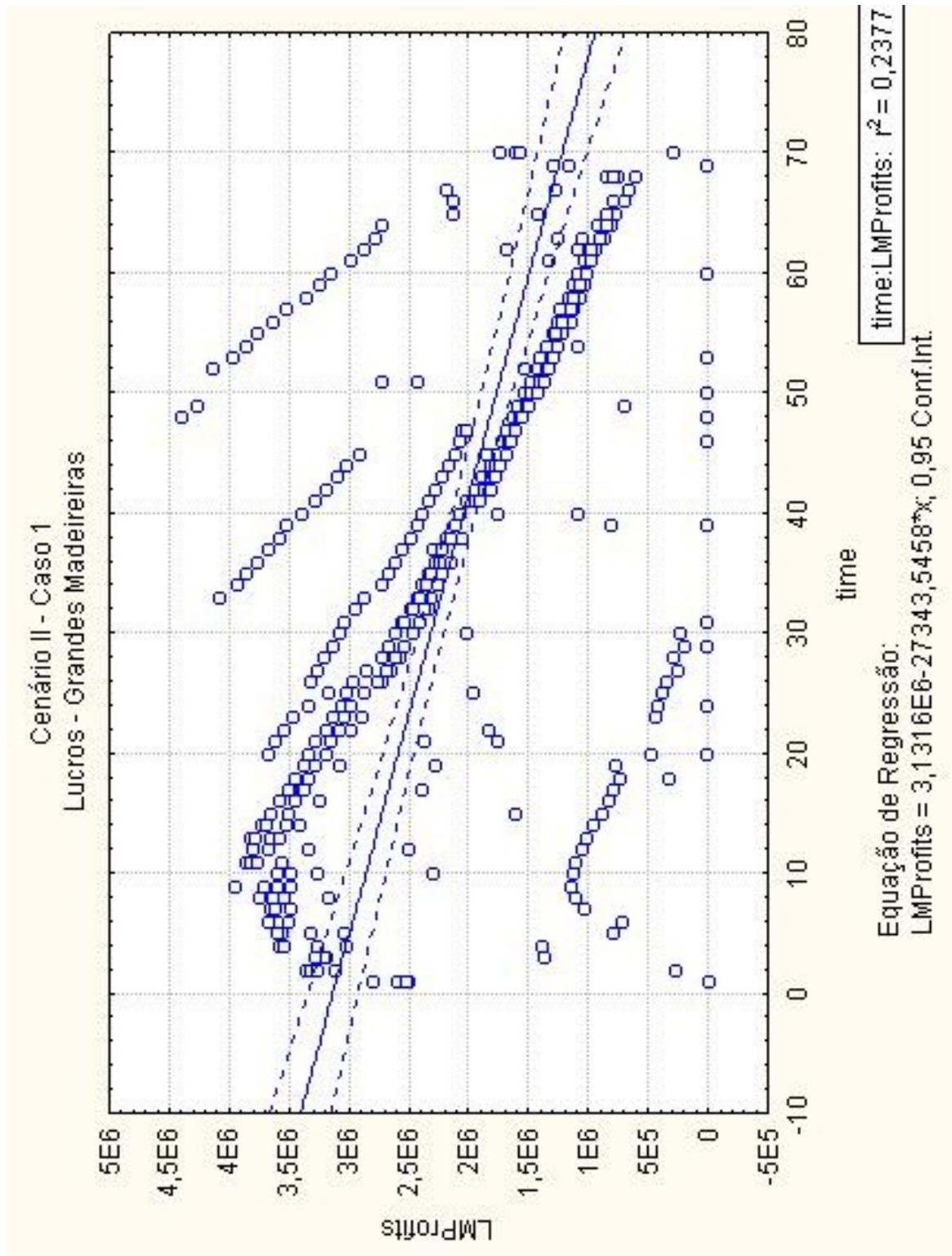


Figura 27: Cenário II - Caso 1: Lucros para Grande Madeireira

Tabela 27: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 2

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	4	0,09	77	0,12
k_2s_1	7	0,18	61	0,10
k_3s_1	4	0,11	54	0,09
k_1s_2	3745	95,09	56648	89,73
k_2s_2	190	4,84	4845	7,67
k_3s_2	34	0,85	797	1,26
Total	3.983,80		62.483,26	

Fonte: Simulação.

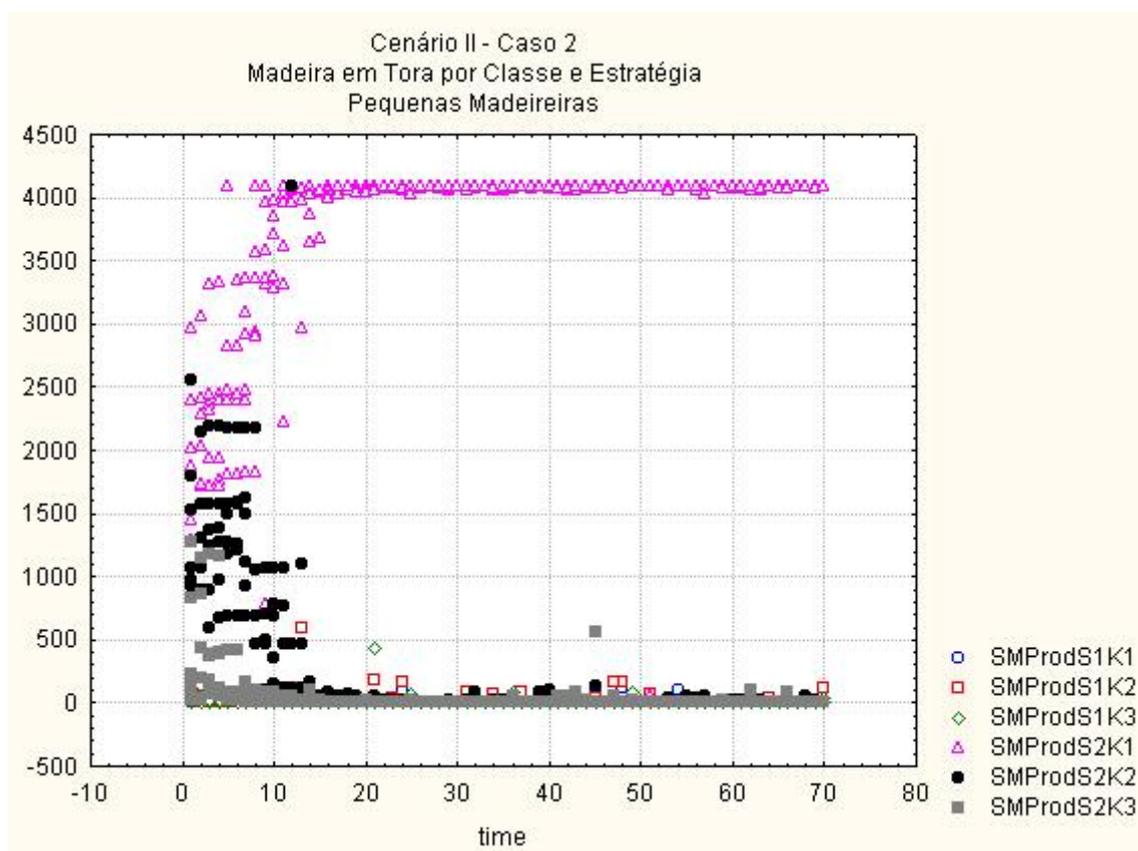
praticam estratégias predatórias.

Este caso não mostra significativa alteração na dinâmica das escolhas das estratégias pelos agentes (Figuras 28 e 29). A mesma instabilidade das estratégias de exploração predatória das grandes madeiras é exibida. As pequenas madeiras exibem (Tabela 27) uma média de 95,09% de escolha da estratégia s_1k_1 e as madeiras grandes exibem uma média de 89,73% da mesma estratégia.

Os lucros (Figuras 30 e 31) tendem a diminuir mais rapidamente para as grandes madeiras. A curva de lucros das grandes madeiras, neste caso, é mais inclinada que a curva das pequenas. A variação dos lucros, neste caso, é maior com a distância para as grandes madeiras do que para as pequenas.

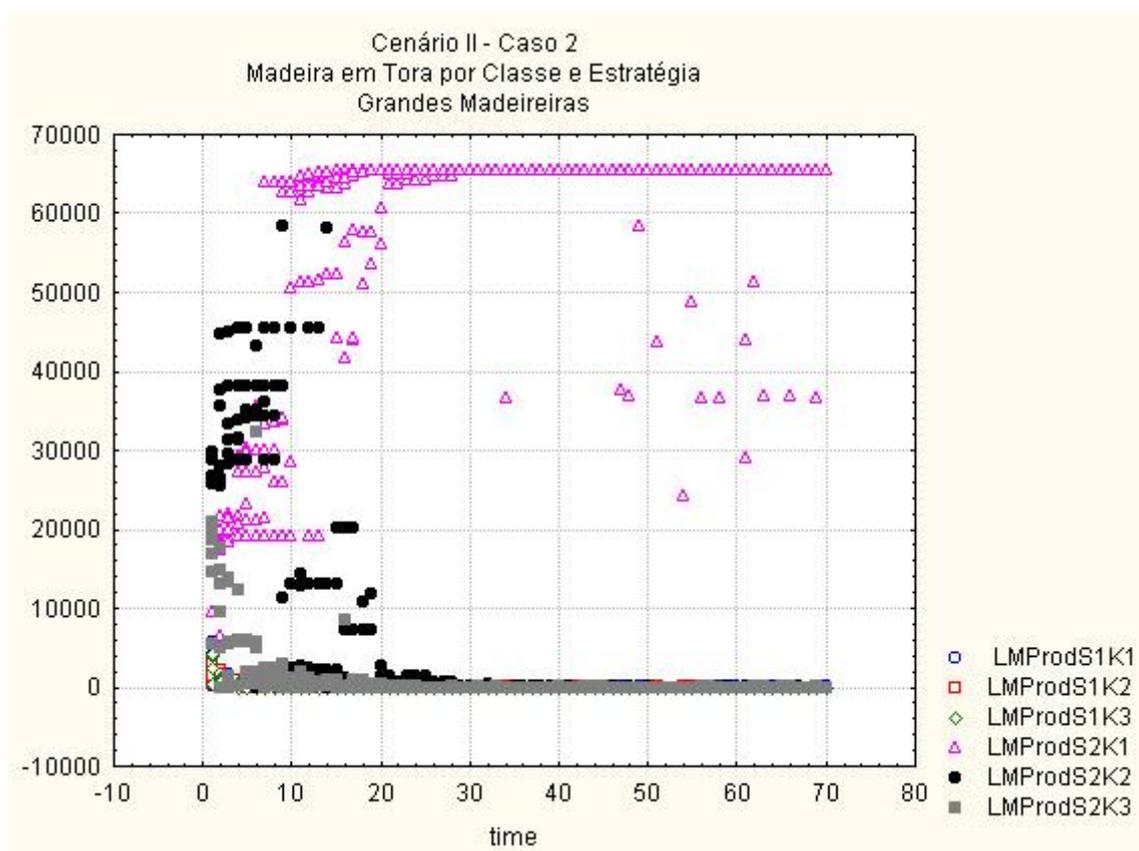
Caso 3

Para o Caso 3 estabeleceu-se o valor de $\tau_{s_1} = 0,08$ e o valor de $\tau_{s_2} = 0,17$. Isto corresponde à diminuição dos níveis de tributação para estratégias sustentáveis e no aumento nos níveis de tributação da indústria, para aquelas madeiras que praticam estratégias predatórias.



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):
 SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
 SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
 SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
 SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
 SMPRODS2K2 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
 SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 28: Cenário II - Caso 2: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 29: Cenário II - Caso 2: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)

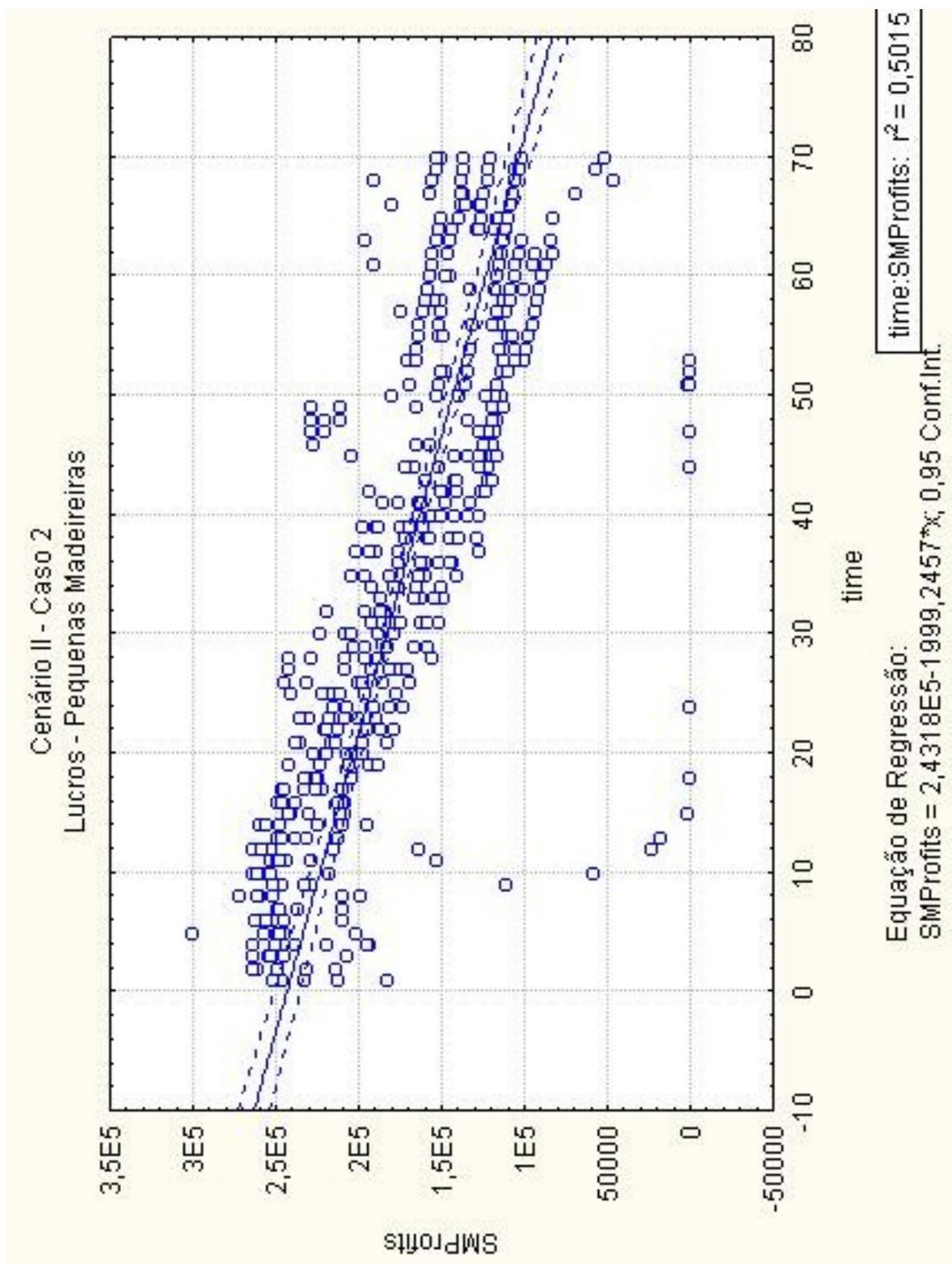


Figura 30: Cenário II - Caso 2: Lucros para Pequena Madeireira

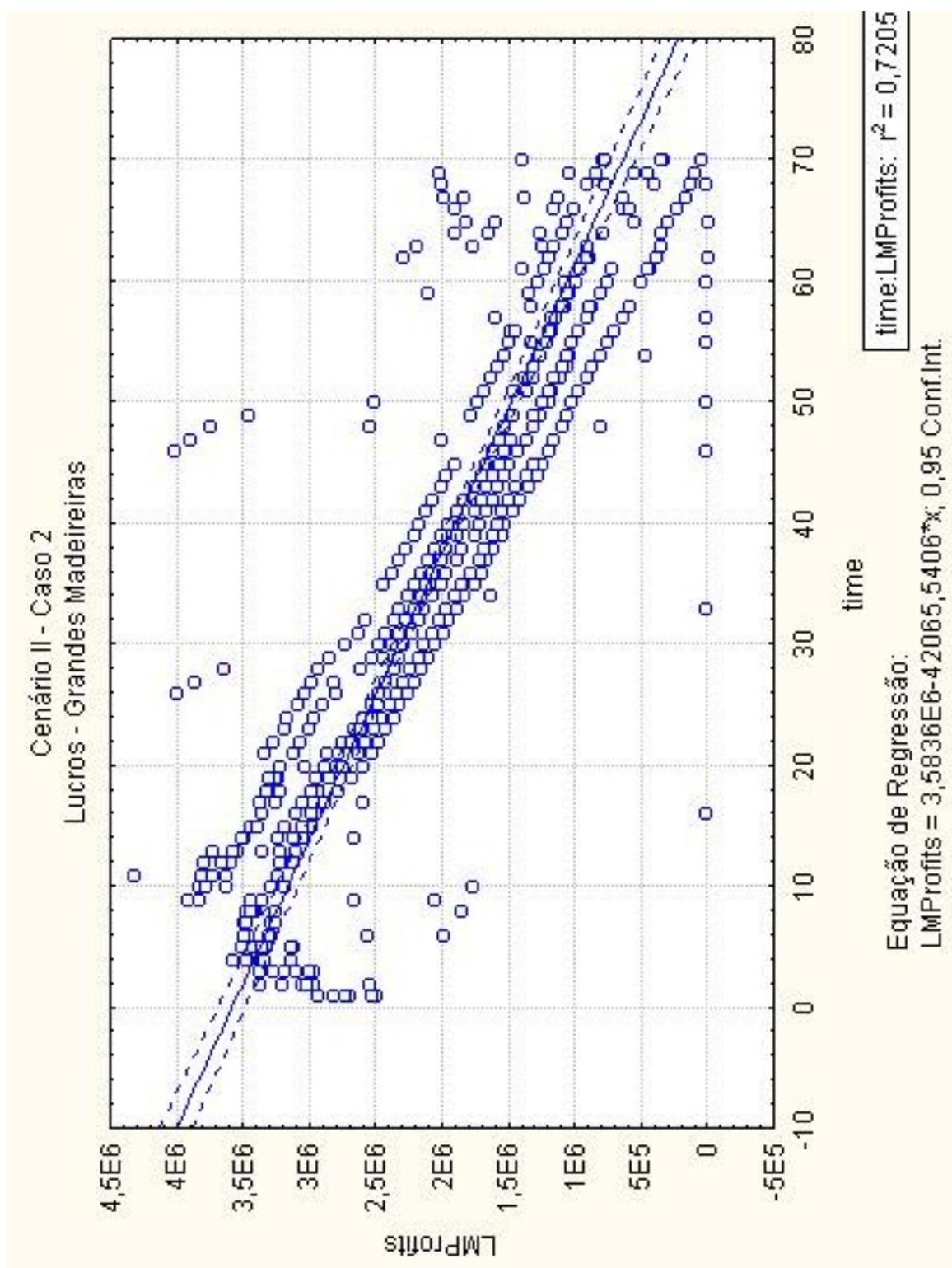


Figura 31: Cenário II - Caso 2: Lucros para Grande Madeireira

Tabela 28: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário II - Caso 3

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	215	5,47	7712	12,22
k_2s_1	9	0,23	167	0,26
k_3s_1	6	0,16	91	0,14
k_1s_2	3379	85,81	39372	62,36
k_2s_2	132	3,36	3863	6,12
k_3s_2	8	0,21	449	0,71
Total	3.750,48		51.655,02	

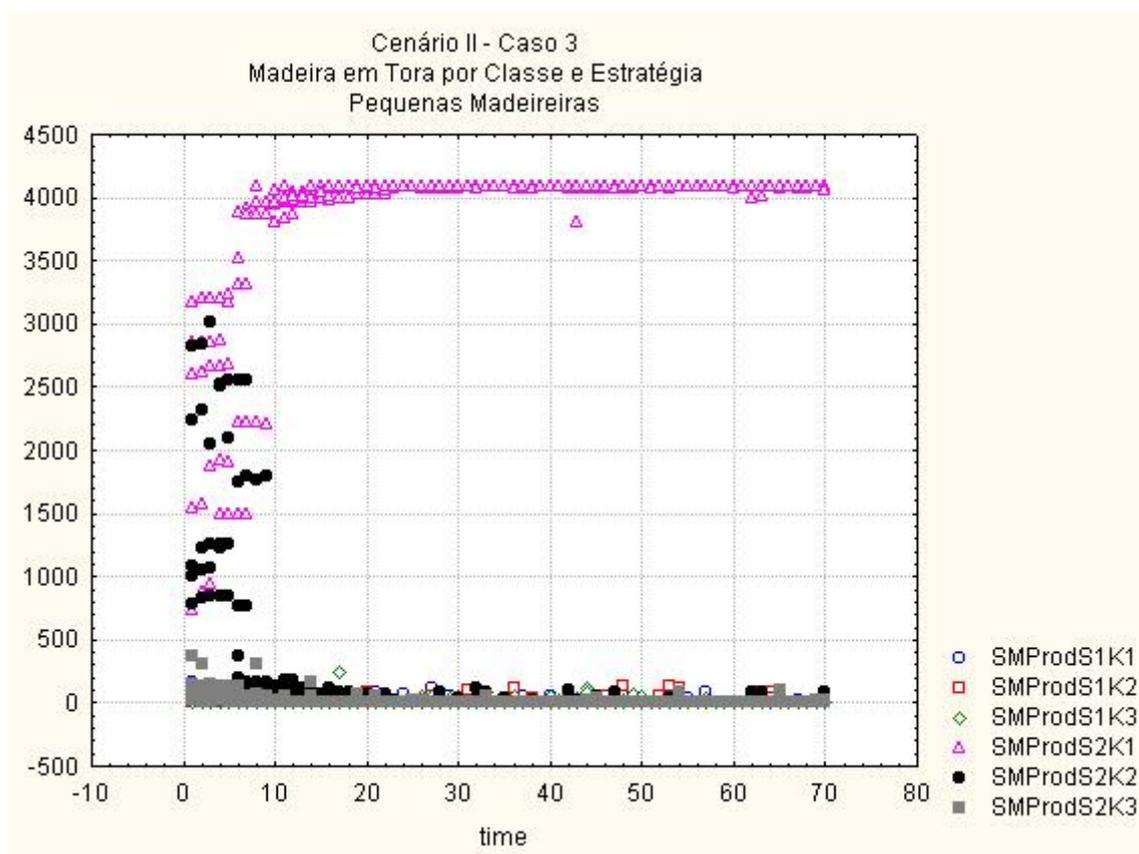
Fonte: Simulação.

Esta escolha leva às madeiras grandes a aumentar a participação das estratégias de coleta sustentáveis (s_1). A participação média das estratégias sustentáveis aumenta para 12,47%, ao passo que as estratégias predatórias caem para 69,19% (Tabela 28). A instabilidade das estratégias das madeiras grandes (Figuras 32 e 33) também aumenta.

As pequenas madeiras também são afetadas pelas variações da tributação, a participação média das estratégias predatórias diminui para 89,39%. As madeiras pequenas, porém, são menos afetadas pelas variações nos níveis de tributos.

6.2.4 Preços Diferenciados por tipo de Estratégia (Cenário III)

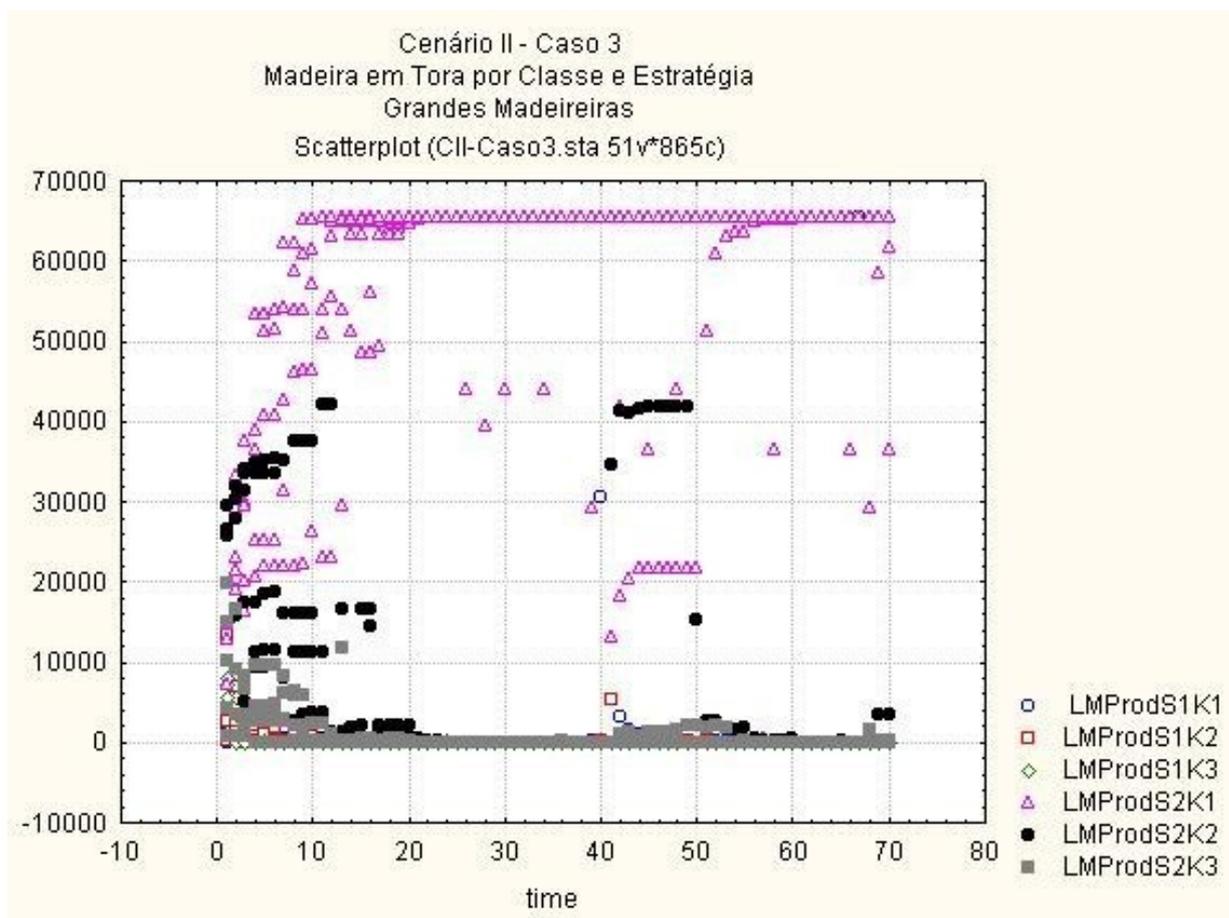
No cenário III procurou-se avaliar a influência dos preços da madeira na escolha das estratégias de exploração pelas grandes e pequenas madeiras. Os preços utilizados nesta série de simulações foram os preços médios apurados na pesquisa de campo para o total da amostra (Tabela 22), estes preços, convertidos em dólar, foram aplicados para as classes de árvore utilizadas. Presume-se aqui que os preços de



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K2 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 32: Cenário II - Caso 3: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);

LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);

LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);

LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);

LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);

LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 33: Cenário II - Caso 3: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)

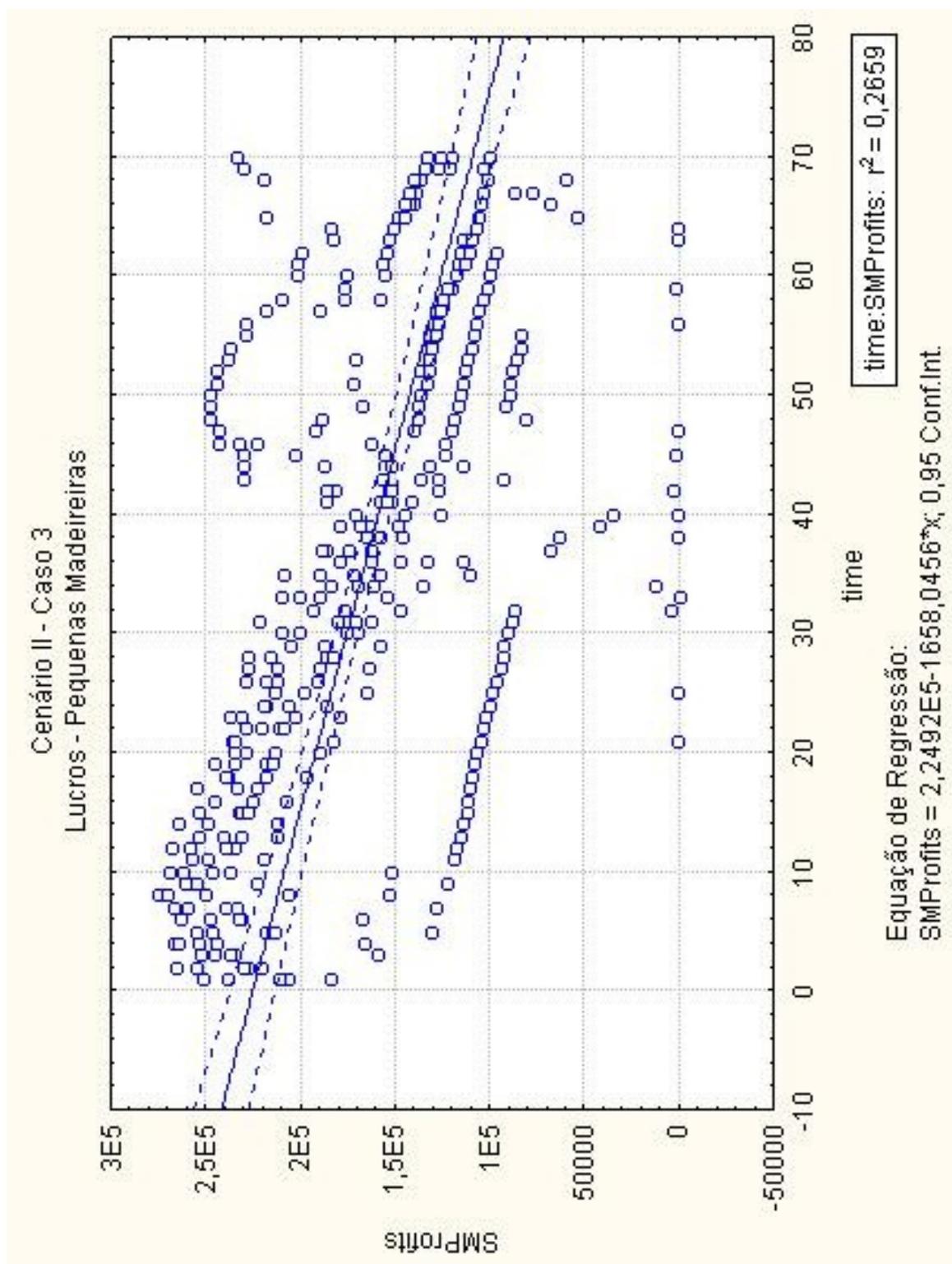


Figura 34: Cenário II - Caso 3: Lucros para Pequena Madeireira

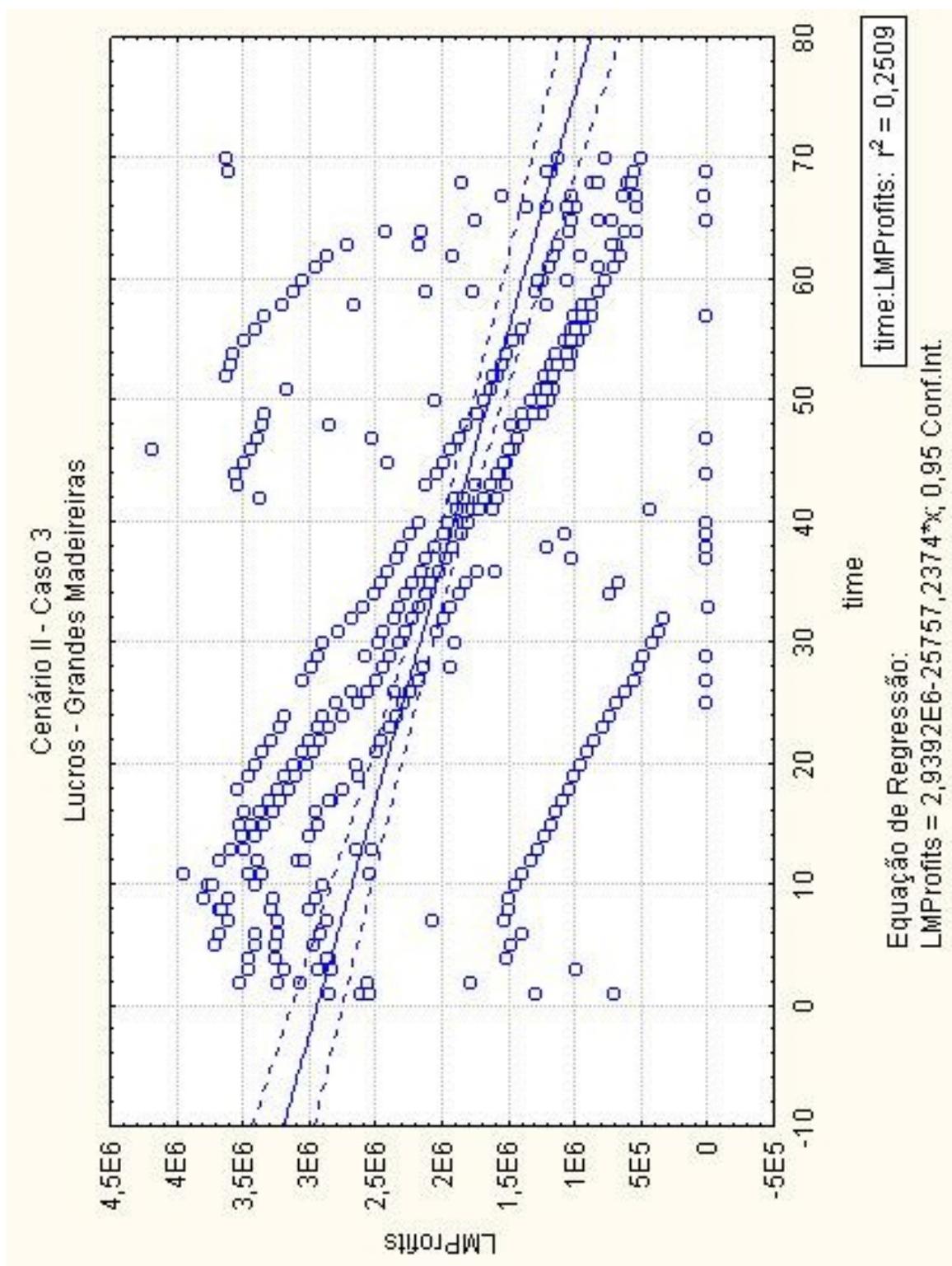


Figura 35: Cenário II - Caso 3: Lucros para Grande Madeira

exportação corresponderiam aos da madeira extraída na estratégia sustentável e os preços para o mercado interno corresponderiam à extração de madeira na estratégia predatória. Os valores iniciais para estes preços são:

- Estratégia sustentável (s_1)
 - Madeira de Alto Valor: US\$ 313,19;
 - Madeira de Médio Valor: US\$ 207,84;
 - Madeira de Baixo Valor US\$ 294,46;

- Estratégia Predatória (s_2)
 - Madeira de Alto Valor: US\$ 244,00;
 - Madeira de Médio Valor: US\$ 144,06;
 - Madeira de Baixo Valor US\$ 120,15;

Estes valores foram aplicados no primeiro caso de simulação.

Caso 1

Para o Caso 1 estabeleceu-se o valor dos preços da madeira pela média apurada na pesquisa de campo. As simulações executadas visavam verificar o comportamento do modelo em relação à variação dos preços. A ideia é avaliar como maiores preços para a madeira extraída com estratégias sustentáveis influenciavam a escolha das estratégias pelos madeireiros.

Os preços influenciaram as estratégias dos madeireiros. Enquanto, no Caso Base, a participação média das estratégias predatórias para as grandes madeiras ficou

Tabela 29: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário III - Caso 1

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	6	0,16	4108	6,51
k_2s_1	4	0,09	169	0,27
k_3s_1	4	0,10	1750	2,77
k_1s_2	3797	96,41	53937	85,43
k_2s_2	68	1,72	1764	2,79
k_3s_2	23	0,59	756	1,20
Total	3.901,40		62.485,28	

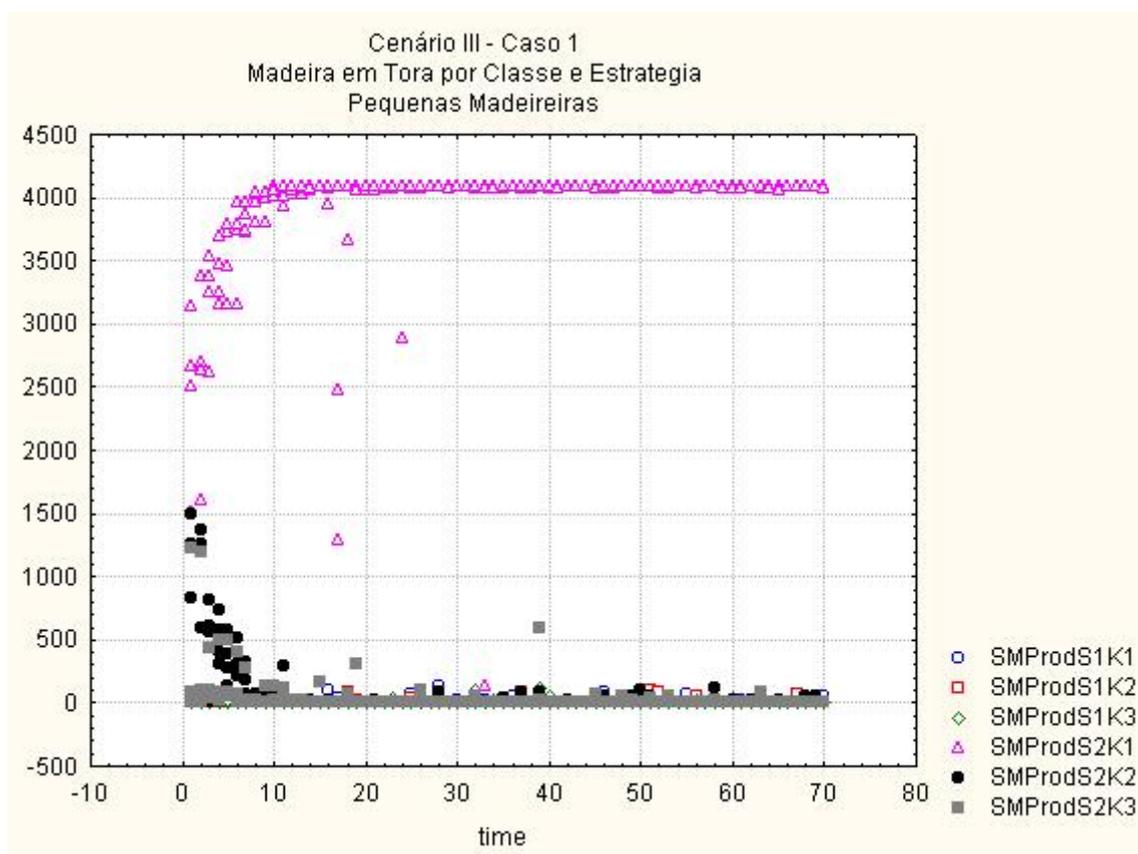
Fonte: Simulação.

em 98,95%, no Caso 1 do cenário III (Tabela 29) a participação média das estratégias s_2 ficou em 89,42%. As estratégias predatórias para as pequenas madeiras também variaram, mas elas não são tão influenciadas pela diferenciação dos tributos por tipo de estratégia. As madeiras pequenas tiveram as estratégias s_2 com 99,75% de participação no Caso Base e 98,72% de participação no caso 1 deste cenário.

As estratégias das madeiras exibem uma maior instabilidade quando a distância de coleta aumenta (Figuras 36 e 37). Esta instabilidade é menor para as pequenas madeiras. fazendo com que as estratégias de coleta não variem significativamente durante a execução das simulações.

Neste cenário os lucros (Figuras 38 e 39) são mais estáveis para as grandes madeiras. Já as pequenas madeiras apresentam uma maior variação nos níveis de lucro durante as simulações. De novo, presume-se que estas variações podem ser provocadas por sucessivas mudanças de área de coleta, o que faz variar os custos de transporte médios usados nas funções objetivo do algoritmo genético.

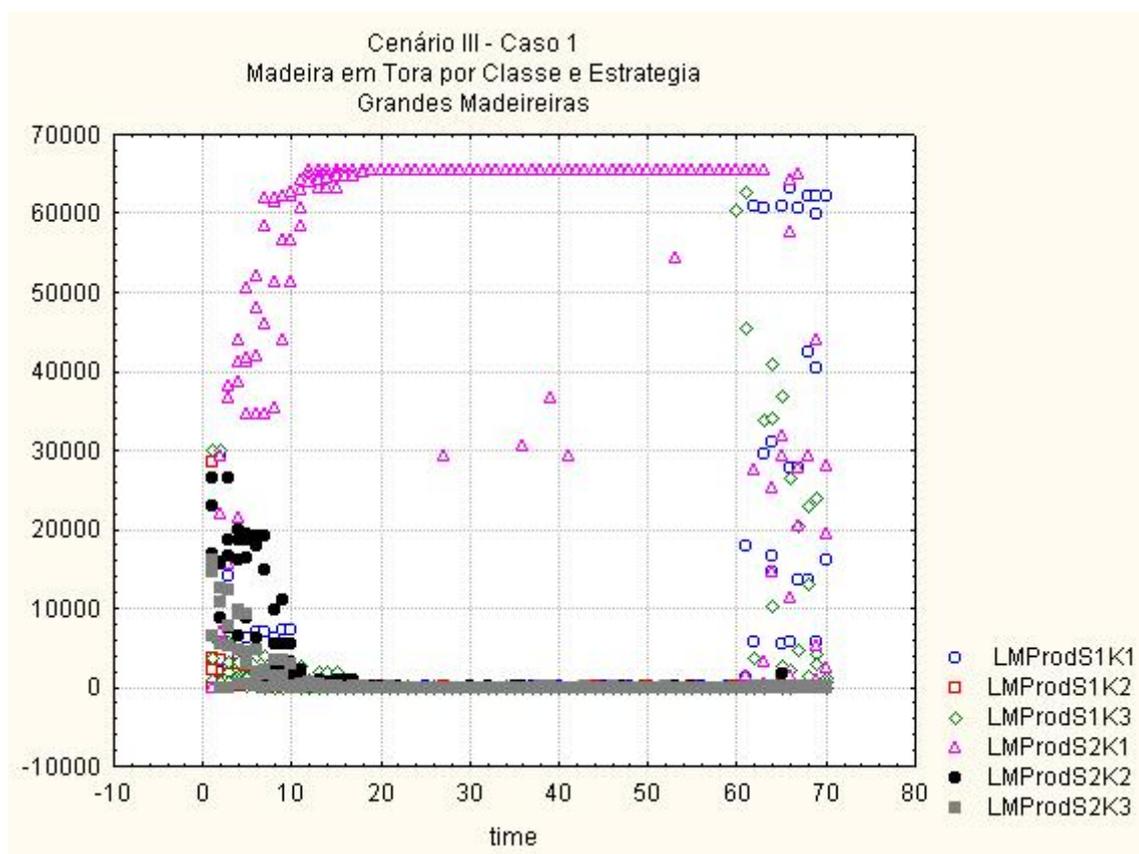
Caso 5



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 36: Cenário III - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 37: Cenário III - Caso 1: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)

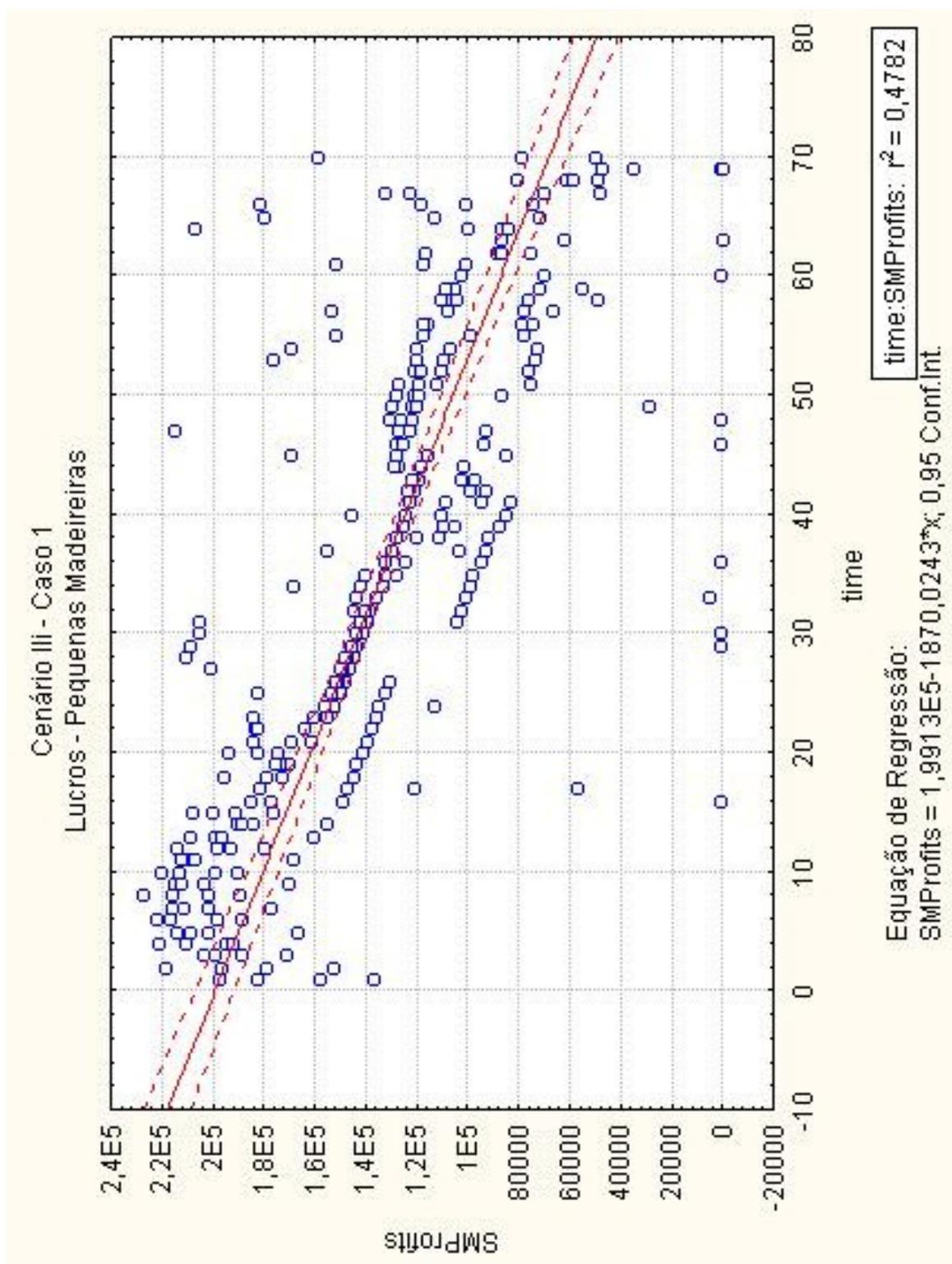


Figura 38: Cenário III - Caso 1: Lucros para Pequena Madeireira

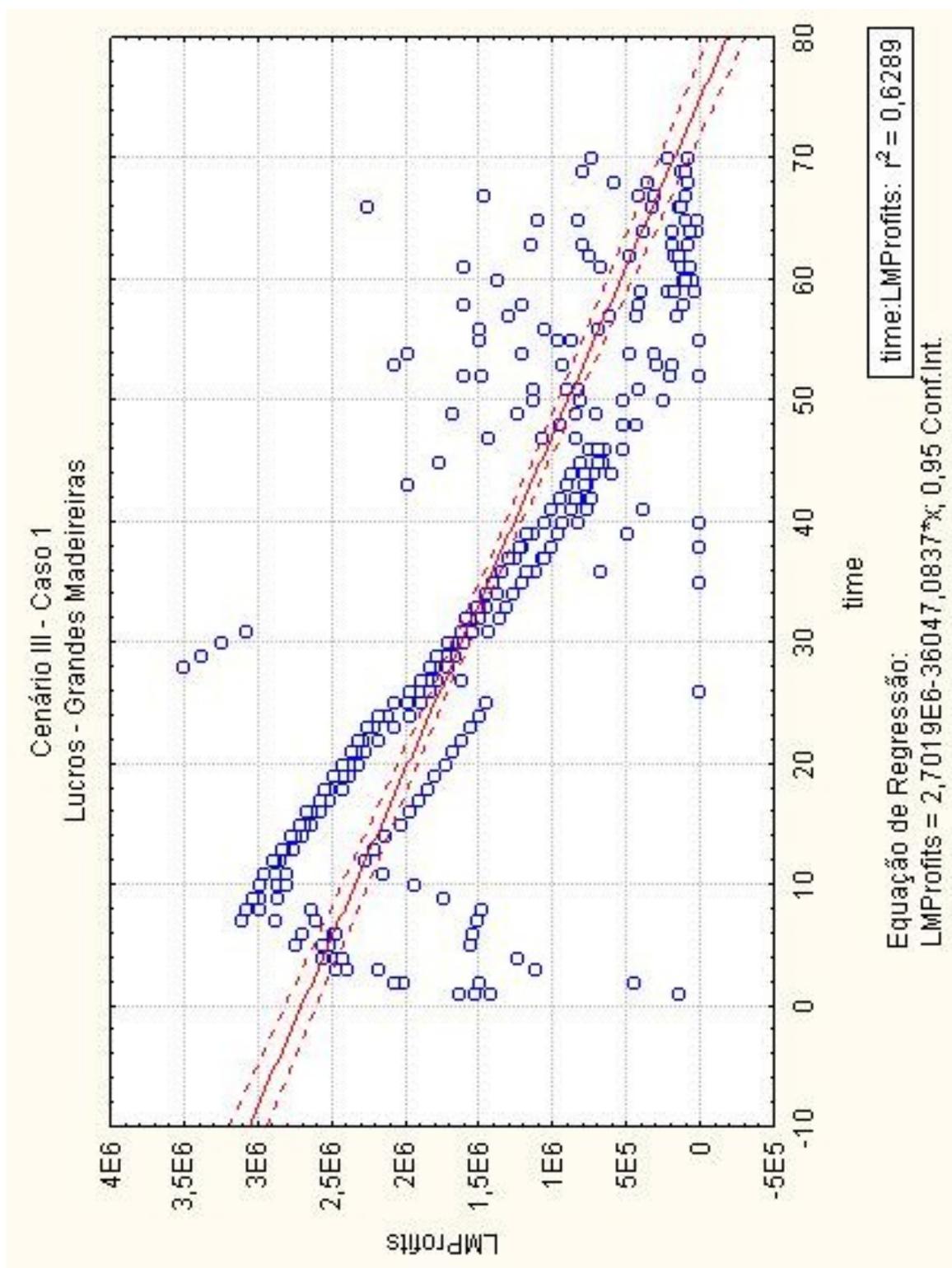


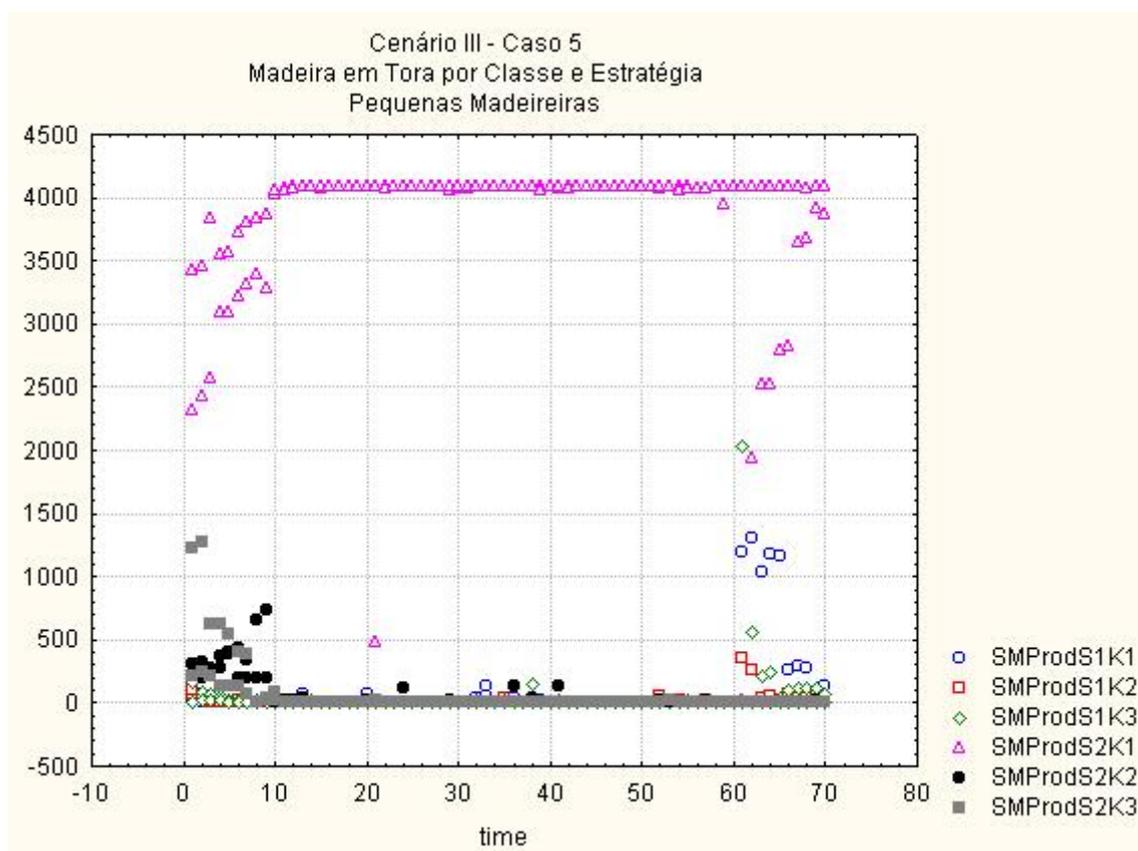
Figura 39: Cenário III - Caso 1: Lucros para Grande Madeireira

Para o Caso 5 estabeleceu-se um aumento de 60% nos preços das madeiras associadas à estratégia sustentável (s_1). Este aumento elevou os preços da madeira para:

- Estratégia sustentável (s_1)
 - Madeira de Alto Valor: US\$ 501,10;
 - Madeira de Médio Valor: US\$ 332,54;
 - Madeira de Baixo Valor US\$ 471,14;

- Estratégia Predatória (s_2)
 - Madeira de Alto Valor: US\$ 244,00;
 - Madeira de Médio Valor: US\$ 144,06;
 - Madeira de Baixo Valor US\$ 120,15;

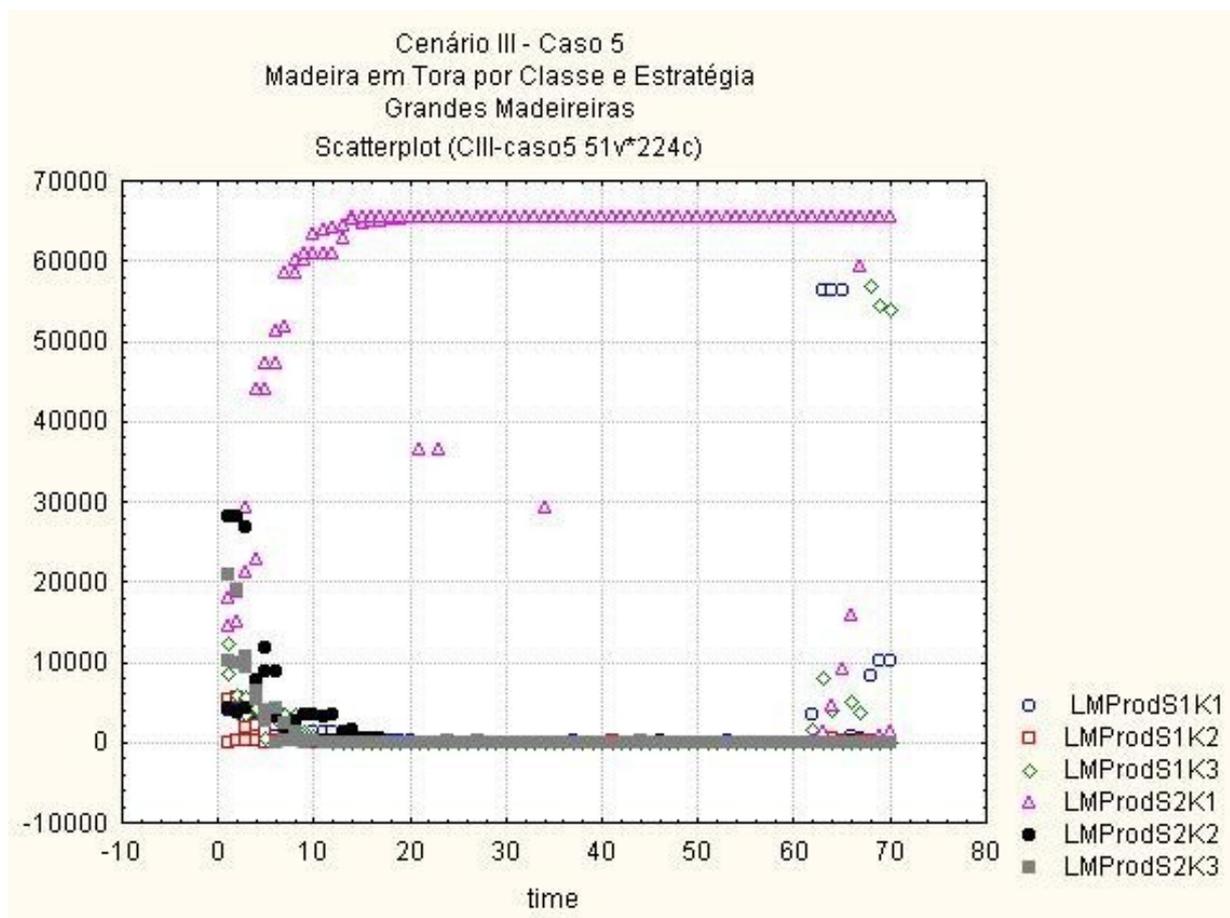
Isto aumentou a atratividade das estratégias predatórias mas não foi suficiente para que as estratégias predatórias se tornassem dominantes. As grandes madeiras novamente se mostraram mais sensíveis às variações nos preços. Para este cenário, as estratégias s_2 diminuíram sua participação média para 65,09% para as grandes madeiras e 94,19% para as pequenas (Tabela 30). No Caso 5, as pequenas madeiras passam a demonstrar alguma instabilidade quando as distâncias de coleta ficam maiores (Figuras 40 e 41). Os lucros (Figuras 42 e 43) ficam mais estáveis tanto para pequenas quanto para grandes madeiras.



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- SMPRODS1K1 - Pequenas, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- SMPRODS1K2 - Pequenas, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- SMPRODS1K3 - Pequenas, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- SMPRODS2K1 - Pequenas, predatória (s_2), alto valor (k_1);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- SMPRODS2K3 - Pequenas, predatória (s_2), baixo valor (k_3);

Figura 40: Cenário III - Caso 5: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Pequenas Madeireiras)



Legenda (nome da variável - Tipo de Madeireira, estratégia, classe de madeira):

- LMPRODS1K1 - Grandes, sustentável (s_1), alto valor (k_1);
- LMPRODS1K2 - Grandes, sustentável (s_1), médio valor (k_2);
- LMPRODS1K3 - Grandes, sustentável (s_1), baixo valor (k_3);
- LMPRODS2K1 - Grandes, predatória(s_2), alto valor (k_1);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória (s_2), médio valor (k_2);
- LMPRODS2K3 - Grandes, predatória(s_2), baixo valor (k_3);

Figura 41: Cenário III - Caso 5: Produção de Madeira em Tora por Classe e Estratégia (Grandes Madeireiras)

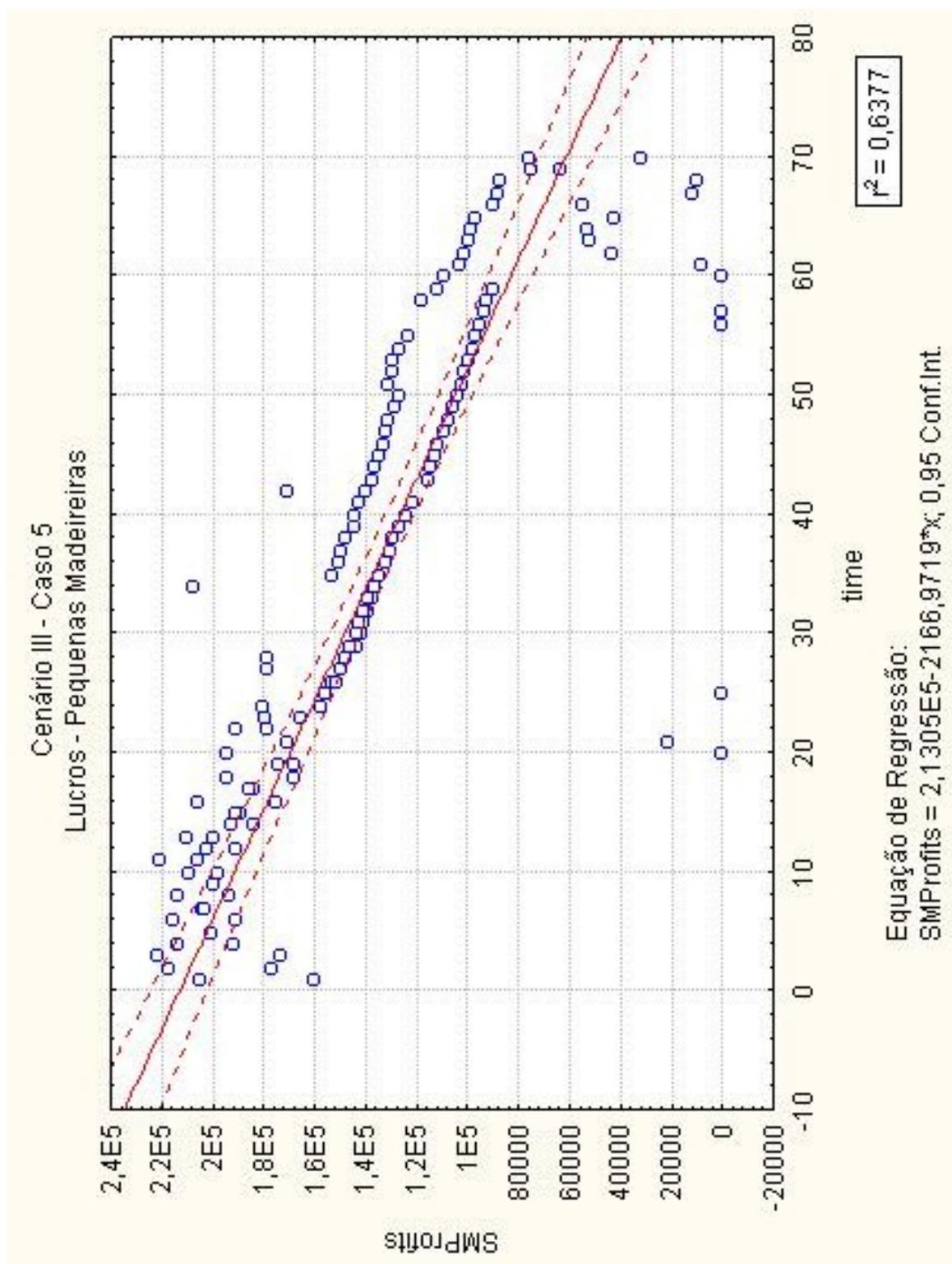


Figura 42: Cenário III - Caso 5: Lucros para Pequena Madeireira

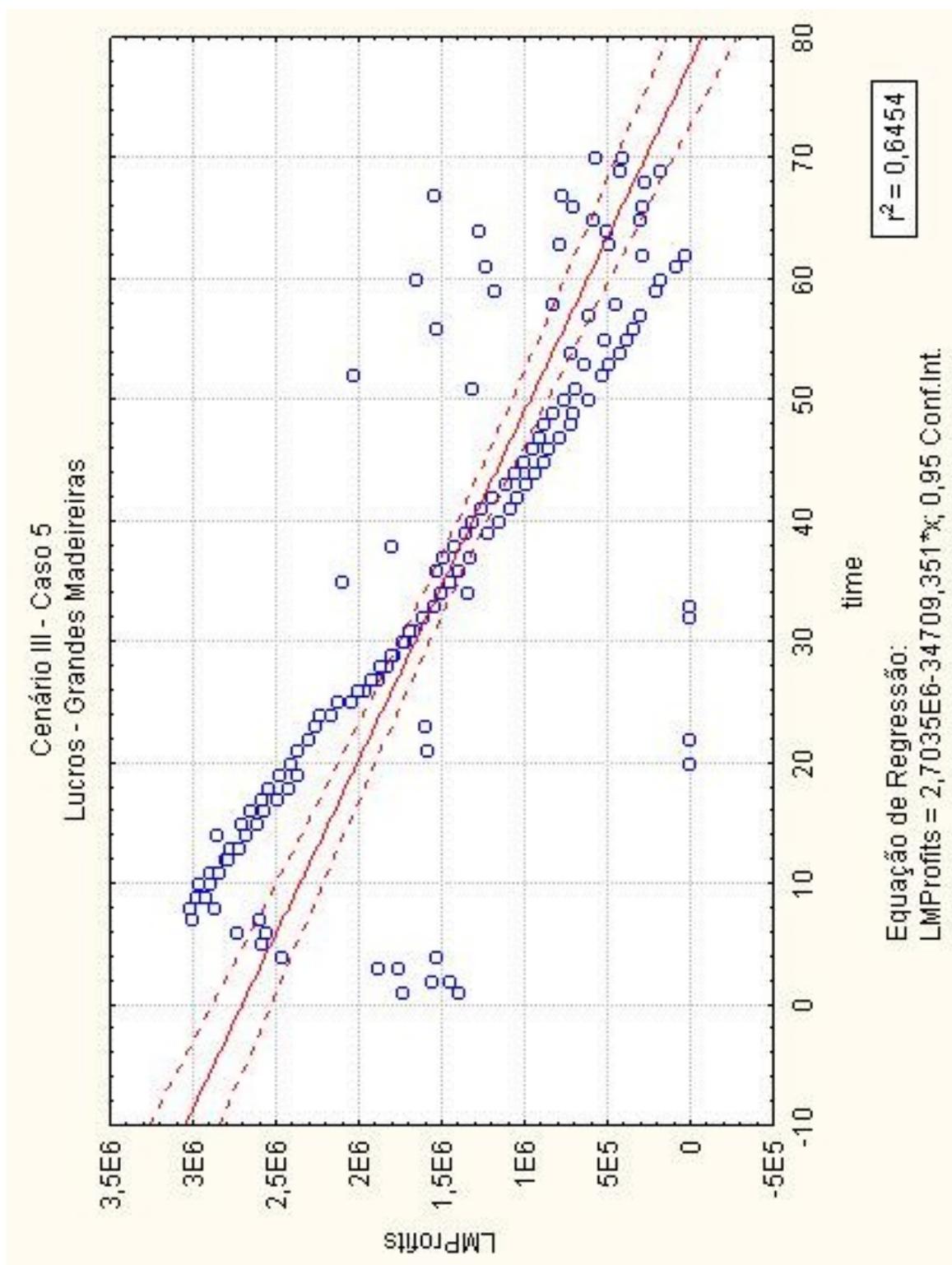


Figura 43: Cenário III - Caso 5: Lucros para Grande Madeira

Tabela 30: Madeira em Tora - Valores Médios para as estratégias de Coleta: Cenário III - Caso 5

Classe/Estratégia	Pequena		Grande	
	Média (m^3)	(%)	Média (m^3)	(%)
k_1s_1	169,38	4,30	12.383,88	19,62
k_2s_1	12,05	0,31	179,51	0,28
k_3s_1	51,29	1,30	7.834,60	12,41
k_1s_2	3.649,34	92,67	39.854,74	63,13
k_2s_2	29,51	0,75	760,00	1,20
k_3s_2	30,31	0,77	482,68	0,76
Total	3.941,88		61.495,41	

Fonte: Simulação.

6.3 Discussão dos Resultados das Simulações

O modelo implementado possibilitou a análise de diversos cenários para a indústria madeireira associando variações no ambiente econômico, com adaptação do comportamento dos agentes. O uso de mecanismos adaptativos (*O algoritmo genético* juntamente com a noção de estratégia, permitiu representar um conjunto amplo de situações e estudar a interação entre variação das condições subsidiárias do modelo e a dinâmica do comportamento dos agentes. Esta interação entre o contexto e as suposições sobre o comportamento dos agentes é um dos aspectos mais interessantes deste tipo de abordagem. Agentes Adaptativos artificiais, são, portanto, uma ferramenta adequada para o estudo deste tipo de problema dinâmico-complexo.

No modelo implementado, o nível de governança é a variável com maior capacidade para influenciar o comportamento dos agentes. Uma probabilidade de apreensão de 10% da madeira em tora extraída ilegalmente já impõe aos agentes a mudança para uma estratégia sustentável.

Mecanismos que associam tarifação diferenciada por tipo de estratégia têm me-

nor influência no processo de tomada de decisão dos agentes. Embora possam alterar as proporções das escolhas das estratégias, estes mecanismos baseados em tarifação diferenciada não são capazes de transformar as estratégias sustentáveis (s_1) em estratégias dominantes.

Preços também têm impacto pequeno quanto à mudança nas estratégias de exploração. São necessárias variações muito grandes nos preços para que os agentes modifiquem a participação das estratégias predatórias na sua estratégia total.

O tamanho da madeireira, no modelo implementado, é significativo em relação ao modo como as estratégias são afetadas pelos diversos cenários. Notadamente, os pequenos madeireiros, implementados no modelo, são menos sensíveis a variações nos níveis de tributação e nos preços de mercado da madeira. Mas são sensíveis, tanto quanto os grandes, a um aumento na probabilidade de apreensão da madeira extraída com estratégias predatórias. Os resultados para os pequenos madeireiros parecem indicar, também, uma maior mobilidade destas madeireiras em relação à escolha das áreas de exploração. Isto porém não pôde ser confirmado no modelo devido aos efeitos cruzados do tamanho da área de exploração implementada no modelo com a capacidade de produção para a pequena madeireira. Isto porém pode ser um indicador que as pequenas madeireiras sofrem uma maior influência do tamanho das áreas de coleta disponíveis. A existência de áreas de coleta com tamanho médio menor pode ser mais adequada para a pequena exploração. Isto pode ser um motivo a mais para que a indústria madeireira tenha passado, em Rondônia, a ter parte significativa de sua produção fornecida por toreiros. Os toreiros teriam esta

maior mobilidade e custos e escalas operacionais adequados para extrair madeira de pequenas áreas.

6.4 Problemas em Aberto

A função de *fitness* do algoritmo genético utiliza o custo médio de transporte para cada madeiraira (c_2) na avaliação da rentabilidade das estratégias. A função de *fitness* ideal teria que avaliar o custo de transporte para cada célula e decidir um conjunto de células para a coleta. A estratégia do madeireiro deveria ser ampliada para conter este *portfolio* de células em vez de apenas um volume de madeira a ser cortada por classe de árvore. Isto permitiria, no modelo, que o agente madeireiro estabelecesse estratégias que considerassem mais adequadamente a madeira de médio e baixo valor existente nas células mais próximas. Isto tornaria o modelo um pouco mais realístico. Esta implementação, porém, aumenta significativamente os custos computacionais do modelo, o que inviabiliza a sua implementação, por ora. Esta implementação pode ser possível se o *Sim(2ECO)* for adaptado para executar as simulações em uma estrutura de computação paralela. Outro aspecto necessário é a integração do ambiente de simulação desenvolvido com um sistema de informações geográficas. Isto permitiria o uso de mapas e imagens de satélite como elementos de entrada e saída do modelo.

É necessário também incorporar dados da floresta. Apesar do modelo implementado ter um modelo de floresta, este não foi utilizado, visto que não se conseguiu dados adequados para calibrá-lo. Este modelo permitiria o estudo da interação entre

a dinâmica da floresta e o padrão de exploração madeireiro. É necessário também calibrar o modelo de simulação com dados de volume de árvores madeiráveis atualizados.

Nos cenários efetuados não foram avaliados os impactos de políticas combinadas. O cruzamento de variações do grau de governança com políticas tributárias e com variações de preços pode servir como um instrumento para o estudo de alternativas mais viáveis de políticas públicas que promovam estratégias sustentáveis de exploração da floresta.

É necessário incorporar os custos de capital de forma precisa para dois tipos de estratégia no modelo simulado. Os custos de capital são um componente fundamental na dinâmica de longo prazo da exploração madeireira e um componente da decisão por estratégias sustentáveis, que só realizam lucros com um prazo maior. Os custos de capital são também um componente fundamental na implementação de um modelo para avaliar o investimento (e, portanto a eventual expansão da capacidade instalada) da indústria madeireira. Um modelo baseado em agentes pode também considerar a evolução estrutural do setor; i.e. a evolução da distribuição entre grandes e pequenas madeireiras do capital, capacidade produtiva e renda da atividade. Um modelo de investimento, associado com os volumes de madeira espacializados podem fornecer um bom indicador da mobilidade espacial da atividade na Amazônia.

Conclusões e Recomendações

Conclusões

Modelos podem ser vistos como *instrumentos do pensamento* que nos permitem enfrentar a complexidade dos problemas que nos afetam. São uma forma de lidar com esta complexidade reduzindo-a a um conjunto de elementos que se possa operar. Esta visão sobre modelagem permite enxergar os modelos não como um “espelho fosco” por onde se vê o mundo, mas, como um brinquedo de armar que nos permite lidar, de forma mais simples com os problemas que se pode enfrentar. Este ”brinquedo“ possibilita que sejam experimentadas diversas possibilidades e que se avalie que situações são possíveis a partir das possibilidades aventadas.

Processos sócio-econômicos são complexos; lidar com esta complexidade para melhor compreendê-los é um dos papéis das ciências sociais. As transformações no ambiente que se enfrenta atualmente na Amazônia são, em sua maior parte, resultado de processos sócio-econômicos. Uma das formas de lidar com esta complexidade é a produção de *instrumentos* que permitam visualizar estes processos de novas maneiras, identificar sua estrutura e enfrentar a complexidade de forma a compreender um pouco melhor a dinâmica destes processos. É neste contexto: a produção de ferramentas para lidar com a complexidade intrínseca do nosso objeto de estudo que se insere este trabalho. A produção de ferramentas que possam ser úteis no estudo

das questões e possibilidades associadas a um desenvolvimento menos insustentável da Amazônia

Para isso produziu-se um arcabouço de simulação multiagentes, chamado neste trabalho de *Sim(2ECO)*. Este arcabouço é aberto, extensível e permite a representação de um ampla gama de problemas que podem associar o ambiente sócio-econômico e o comportamento dos agentes. Este arcabouço se insere numa classe de ferramentas em desenvolvimento por diversos grupos de pesquisa que buscam tratar a questão da complexidade de uma maneira mais adequada ao estudo de suas características estruturais.

Com o *Sim(2ECO)* foi possível implementar um modelo para o comportamento de empresas madeireiras que permitiu o estudo de como diversas alternativas de política pública afetam a tomada de decisão destes agentes e de como estas decisões podem afetar o lugar onde estes agentes estão imersos. Em relação à política pública, foram avaliados os impactos de um aumento da capacidade de fiscalização do Estado sobre a indústria madeireira e de políticas alternativas de tributação da indústria sobre as escolhas dos madeireiros de suas estratégias de extração de madeira. Também foram avaliados os impactos de mudanças nos preços de mercado da madeira sobre as estratégias de extração.

A noção de estratégia adaptativa foi utilizada na implementação do modelo do comportamento do agente. Para possibilitar que os agentes modelados adaptassem suas estratégias às mudanças das condições subsidiárias que configuram o ambiente do agente, foi utilizado um algoritmo genético.

Em relação à primeira hipótese levantada neste trabalho, se pôde constatar que as atuais condições de exploração de madeira ainda são, em sua maioria, favoráveis ao uso pelos agentes de estratégias predatórias. Estas estratégias permitem ganhos de curto prazo mais altos e são preferíveis a estratégias sustentáveis. Dado um contexto de baixa fiscalização e pouca presença do Estado nas zonas de extração, as estratégias predatórias de exploração vão ser sempre preferíveis às estratégias sustentáveis, visto que seus ganhos de curto prazo são bem mais altos do que os de estratégias sustentáveis.

Quando à segunda hipótese, os ganhos das estratégias predatórias diminuem significativamente em relação aos ganhos das estratégias sustentáveis com um pequeno aumento na probabilidade de apreensão da madeira extraída ilegalmente. Um aumento de 0% para 10% do total de madeira ilegal apreendida foi suficiente para tornar as estratégias sustentáveis dominantes em relação às predatórias. Políticas de tributação diferenciadas para as estratégias sustentáveis aumentam a sua atratividade mas não são suficientes para impor as estratégias sustentáveis como dominantes.

O tamanho das madeiras é significativo em relação a como elas são afetadas por diversas alternativas de política pública. Pequenas madeiras são menos sensíveis a políticas de tributação diferenciada que grandes madeiras.

Em relação à terceira hipótese, pode-se afirmar que preços de mercado diferenciados são significativos, mas não suficientes, para tornar estratégias sustentáveis dominantes. As variações dos preços de mercado da madeira também afetam dife-

rentemente pequenas e grandes madeiras. Grandes madeiras são mais sensíveis a variações de preços de mercado.

Recomendações

Quanto ao arcabouço de simulação implementado as principais recomendações são:

- É necessário implementar uma versão do simulador que possa ser executada numa estrutura de computação paralela. Isto permitirá a execução de modelos de maior escala e diminuirá significativamente os tempos para a execução de simulações. Para isso, porém, são necessárias modificações significativas na estrutura de *schedule*.
- Deve-se implementar uma conexão entre o ambiente de simulação e sistemas de informação geográfica. Isto permitirá com que mapas e imagens de satélite possam ser utilizadas como entrada e saída das simulações aumentando assim a capacidade explicativa do modelo. Esta integração pode incorporar toda a *expertise* para o tratamento de dados espacializados disponíveis em um Sistema de Informações Geográficas.

As recomendações em relação ao modelo implementado são as seguintes:

- É necessário implementar uma função *fitness* no algoritmo genético que incorpore o custo de transporte para cada célula isto permitirá que a dinâmica

espacial do processo de extração da madeira aconteça de forma mais realística e diminuirá o peso que a madeira da classe k_1 tem no modelo.

- Dados atualizados para o volume e distribuição de madeira na Amazônia devem ser utilizados para calibrar o aspecto espacial do modelo. Isto permitirá que se estude com maior precisão a espacialidade do processo de exploração, visto que a dinâmica espacial da atividade madeireira está também ligada a disponibilidade de estoques de madeira.
- Pode-se incorporar um modelo dinâmico para a floresta. A produção de um modelo deste tipo é, por si, um resultado importante, pois as taxas de crescimento e recuperação das áreas exploradas podem ajudar a outros modelos (como os climatológicos, por exemplo) a melhorar sua acuidade na consideração de áreas impactadas pela extração madeireira.

Recomendações sobre o estudo da indústria madeireira:

- É necessário estudar a dinâmica estrutural da indústria madeireira na Amazônia, suas cadeias de fornecimento de matéria-prima e de comercialização, seus fluxos de capital, sua articulação com as demandas locais, nacionais e globais. Este estudo deve ser feito, necessariamente, considerando as diferenças de tamanho das madeireiras. Políticas para a indústria afetam diferentemente empresas de pequeno e de grande porte, portanto, é necessário que, em modelos de avaliação de impacto das políticas para o setor, este aspecto estrutural seja considerado.

- Uma avaliação precisa dos custos de capital para a implantação de manejo sustentável é um componente fundamental de qualquer proposta que vise a promoção de práticas de manejo sustentável. Sem uma avaliação cuidadosa e realística destes custos, dificilmente os modelos de política pública vão avaliar consistentemente a atratividade da adoção de estratégias sustentáveis de manejo pela indústria.
- O impacto de políticas que combinem um aumento da repressão à extração predatória com ações de promoção de estratégias sustentáveis de exploração (como tarifação e crédito diferenciados) devem ser avaliados. A indústria madeireira em Rondônia é extremamente heterogênea, estratégias simplistas e uniformes podem ter impactos menores que o esperado visto que provavelmente atingirão em menor grau os atores que têm a maior participação na extração da madeira da floresta: os pequenos madeireiros.

Uma indústria madeireira sustentável pode ser uma fonte de incorporação de externalidades positivas associadas com a preservação de parte significativa da floresta. A promoção desta indústria responsável, porém, passa necessariamente por uma política pública realista, que considere a racionalidade econômica dos processos de tomada de decisão dos madeireiros. Esta racionalidade se dá num contexto de ausência de fiscalização, ocorrência generalizada da extração ilegal e indiferença do mercado a estratégias de extração sustentáveis que implicam em maiores custos e preços. Políticas globais para o setor madeireiro devem considerar como restrição à sua eficácia a racionalidade econômica dos madeireiros como agentes inteligentes.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, O. T. de; UHL, C. *Planejamento Do Uso Do Solo Do Município de Paragominas*. Belém, PA: IMAZON, 1998. (Amazônia, v. 9).
- ARIFOVIC, J. The behavior of the exchange rate in the genetic algorithm and experimental economics. *Journal of Political Economy*, v. 104, n. 3, 1996.
- ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A. *Preços Da Madeira Em Pé Em Pólos Madeireiros Próximos de Cinco Florestas Nacionais Da Amazônia*. Brasília, DF, 2002.
- ARTHUR, W. B. Designing economic agents that act like human agents: A behavioral approach to bounded rationality. *American Economic Review*, v. 81, n. 2, may 1991.
- ARTHUR, W. B. Inductive reasoning and bounded rationality. *American Economic Review*, v. 84, n. 2, p. 406–411, may 1994.
- ARTHUR, W. B.; DURLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The economy as an evolving complex system II*. Santa Fe Institute, Reading, MA: Addison Wesley, 1996.
- ARTHUR, W. B. et al. Asset price under endogenous expectations in an artificial stock market. In: ARTHUR, W. B.; DARLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Redwood, CA: Addison-Wesley, 1997. p. 15–44.
- AXELROD, R. *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books, 1984.
- AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. In: CONTE, R.; HEGSELMANN, H.; TERNA, P. (Ed.). *Simulating Social Phenomena*. Berlin: Springer, 1997. (Simulating Social Phenomena), p. 21–40.
- AXELROD, R. M. *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- BALZER, W.; BRENDEL, K. R.; HOFFMAN, S. Bad arguments in the comparison of game theory and simulation in social studies. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4, n. 2, march 2001. Disponível em: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/1.html>>.

BARRETO, P. et al. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 108, p. 9–26, 1998.

BEECHAM, D. E.; FARNSWORTH, K. D. Animal foraging from an individual perspective: An object orientated model. *Ecological Modelling*, v. 113, p. 141–156, 1998.

BENTHAM, J. *Introdução Aos Princípios Da Moral e Legislação*. 2 ed. São Paulo: Abril Cultural, 1979. (Os Pensadores).

BERGER, T. Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, v. 25, p. 245–260, 2001.

BINMORE, K. Review of "the complexity of cooperation: Agent based models of competition and collaboration. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 1, n. 1, January 1998.

BINMORE, K.; SAMUELSON, L. Evolution and mixed strategies. *Games and Economic Behavior*, v. 34, n. 2, p. 200–266, 2001.

BLUME, L. Population games. In: ARTHUR, W. B.; DARLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1997. (SFI - Studies on The Sciences of Complexity), p. 425–460.

BOLTZ, F. et al. Financial returns under uncertainty for conventional and reduced-impact logging in permanent production forests in the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*, v. 39, p. 387–398, 2001.

BOSCOLO, M.; BUONGIORNO, J. Managing a tropical rainforest for timber, carbon storage and tree diversity. *Commonwealth Forest Review*, v. 76, n. 4, p. 246–254, 1997.

BOSCOLO, M.; BUONGIORNO, J.; PANAYOTOU, T. Simulating options for carbon sequestration through improved management of a lowland tropical rainforest. *Environment and Development Economics*, v. 2, n. 3, p. 239–261, 1997.

BOSCOLO, M.; VINCENT, J. *Promoting Better Logging Practices in Tropical Forests: A Simulation Analysis of Alternative Regulations*. 1998. Harvard Institute for International Development, Harvard University. Development Discussion Paper no. 652.

BOUSQUET, F. *Modelisation d'Accompagnement: simulations multi-agents et gestion de ressource naturelles et renouvelables*. Lyon, march 2001.

BOUSQUET, F. et al. Agent-based modelling, game theory and natural resource management issues. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4, n. 2, March 2001.

- BOWER, A. G.; GARBER, S.; WATSON, J. C. Learning about a population of agents and the evolutions of trust and cooperation. *International Journal of Industrial Organization*, v. 15, p. 165–190, 1996.
- BRANDER, J. A.; TAYLOR, M. S. *International Trade and Open Access Renewable Resources: The Small Open Economy Case*. 1994. In (KAYMOVITZ; ANGELSEN, 1998).
- BUCKHART, R. *Schedules of Activity in the SWARM Simulation System*. 1997. OOPSLA 97 - Workshop on OO Behavioral Semantics. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/projects/swarm>>.
- BULTE, E.; van SOEST, D. P. Tropical deforestation, timber concession and slash and burn agriculture - why encroachment may promote conservation of primary forests. *Journal of Forest Economics*, v. 2, p. 55–66, 1996.
- CHEN, A.-S.; LEUNG, M. T. Regression neural network for error correction in foreign exchange forecasting and trading. *Computers and Operations Research*, v. 31, n. 7, p. 1049–1068, jun 2004.
- CIRAD. *CORMAS: Natural Resources and Agent-Based Simulations*. Nov 2001. [Http://www.cormas.cirad.fr/indexeng.htm](http://www.cormas.cirad.fr/indexeng.htm).
- COHEN, M. D.; RIOLO, R.; AXELROD, R. The role of social structure in the maintenance of cooperative regimes. *Rationality and Society*, v. 13, n. 1, p. 5–32, Feb 2001.
- COLLIER, N. *RePast: An Extensible Framework for Agent Simulation*. 2003. [Http://repast.sourceforge.net](http://repast.sourceforge.net). Social Science Research Computing University of Chicago.
- COUCLELIS, H. Why I no long work with agents: A challenge for ABMs of human-environment interactions. In: PARKER, D. C.; BERGER, T.; MASON, S. M. (Ed.). *Agent Based Models of Land-User and Land-Cover Change*. Bloomington, Indiana: LUCC Focus 1 Office, Antropological Center for Training and Research on Global Environmental Change (ACT), Indiana University, 2002, 2001. p. 3–5.
- CRESSMAN, R. Evolutionary stability in the finitely repeated prisoner's dilemma game. *Journal of Economic Theory*, v. 68, p. 234–248, Jan 1996.
- CROWLEY, P. et al. Evolving cooperation: the role of individual recognition. *BioSystems*, v. 37, p. 49–66, 1996. Very interesting - Using genetic algorithms, Detailsof implementation.
- CURRY, B. 'Simple' neural networks for forecasting. *Omega*, v. 32, n. 4, p. 97–100, apr 2004.

- DANIELS, M. *Integrating Simulation Technologies With Swarm*. october 2003. [Http://www.santafe.edu/mgd/anl/anlchicago.html](http://www.santafe.edu/mgd/anl/anlchicago.html). In *Agent Simulation: Applications, Models, and Tools* - University of Chicago.
- DARLEY, V. M.; KAUFFMAN, S. A. Natural rationality. In: ARTHUR, W. B.; DARLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1997. (SFI - Studies on The Sciences of Complexity), p. 45–80.
- DAVIDSON, P. Is probability theory relevant for uncertainty? a post-keynesian perspective. *Journal of Economic Perspectives*, v. 5, n. 1, 1991.
- DEADMAN, P. Modelling individual behavior and group performance in an intelligent agent-based simulation of the tradgedy of the commons. *Journal of Environmental Management*, v. 56, p. 159–172, 1999.
- DEADMAN, P. J.; SCHLAGER, E. Models of individual decision making in agent-based simulation of common-pool-resource management institutions. In: GIMBLETT, H. R. (Ed.). *Integrating GIS and Agent-Based Modelling Techniques for Understanding Social and Ecological Processes*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- DEADMAN, P. J.; SCHLAGER, E.; GILBERT, N. Simulating common pool resource management experiments with adaptative agents employing alternate communication routines. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4, n. 2, March 2001.
- DENNET, D. C. *The Intentional Stance*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press, 1987.
- DORAN, J. Intervening to achieve co-operative ecosystem management: towards an agent based model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4, n. 2, march 2001. Disponível em: <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/4.html>>.
- DRESCHER, G. L. *Made-Up Minds: A Constructivist Approach to Artificial Intelligence*. Tese (Doutorado) — MIT, Cambridge-MA, 1991.
- DURFEE, E.; et al. Trends in cooperative distributed problem solving. *IEEE Transactions in Knowledge data Engineering*, v. 11, n. 1, 1989.
- EDMONDS, B. Capturing social embeddedness: A constructivist approach. *Adaptive Behavior*, v. 7, p. 323–348, 1999.
- EDMONDS, B. Modelling bounded rationality in agent-based simulations using the evolution of mental models. In: BRENNER, T. (Ed.). *Computational Techniques for Modelling Learning in Economics*. [S.l.]: Kluwer, 1999. p. 305–332.

- EPSTEIN, J.; AXTELL, R. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Cambridge, MA: The Mit Press, 1996.
- FAO. *FAOSTAT - Sawnwood Production - Brazil - 1980-2004*. 2004.
[Http://faostat.fao.org](http://faostat.fao.org).
- FEENY, D.; et. al. The tragedy of the commons: Twenty-two years later. *Human Ecology*, v. 18, n. 1, p. 1–19., 1990.
- FINDLAY, R.; LUNDAHL, M. Natural resources 'vent-for-surplus' and the staples theory. In: MEYER, G. M. (Ed.). *From Classical to Development Economics*. London: St Martin Press, 1994. p. 68–93.
- FONSECA, G.; USSHER, L. J. *History of Economic Thought*. jan 2004.
[Http://cepa.newschool.edu/het/home.htm](http://cepa.newschool.edu/het/home.htm).
- GEIST, H.; LAMBIN, E. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, v. 52, n. 2, p. 143–150, february 2002.
- GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, v. 52, p. 143–150, 2002.
- GILBERT, N.; TROITZSCH, K. *Simulation for the Social Scientist*. London: Open University, 1999.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- HARDIN, G. The tragedy of the commons. *Science*, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, Dec 1968.
- HARDIN, R. *Collective Action*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1984.
- HARSANYI, J. C. Games with incomplete information played by “bayesian” players i: The basic model. *Management Science*, v. 14, p. 159–182, 1967. In *Classics in Game Theory*, Princeton University Press, Princeton, 1997. Harold W Kuhn, ed.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- HOLLAND, J. H. The global economy as an adaptive process. In: *SFI Studies in the Sciences of Complexity*. Redwood, CA: Addison-Wesley, 1988. p. 117–124.
- HOLLAND, J. H. *Hidden Order: how adaptation builds complexity*. Cambridge, MA: Perseus Books, 1995.

- HOLLAND, J. H.; MILLER, J. H. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*, American Economic Association, v. 81, p. 365–370, 1991. Papers and Proceedings.
- HUMMEL, A. C. *Normas de Acesso Ao Recurso Florestal Na Amazônia: O Caso Do Manejo Madeireiro*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Biologia Tropical e Recursos Naturais (INPA/UA), 2001.
- IBAMA, I. *Comercialização de Produtos Madeireiros Da Amazônia - 2000*. 2000. IBAMA-DIREF Coordenadoria Geral de Recursos Florestais.
- IBGE, F. Censo Agropecuario, *Censo Agropecuario de 1996*. 1996.
- INPE, I. *Desflorestamento 1995-1997*. Sao Jose dos Campos, Sao Paulo, Brasil, 1997.
- JOHNS, J.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage in planned and unplanned logging operations and its implications for sustainable timber production in the eastern amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 89, n. 1-3, p. 59–77, 1996.
- KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, v. 47, n. 2, p. 263–291, 1979.
- KAIMOWITZ, D.; ANGELSEN, A. *Economic Models of Tropical Deforestation: A Review*. Bogor, Indonesia: CIFOR - Center for International Forestry Research, 1998.
- KEYNES, J. M. *A Treatise on Probability*. London: MacMillan, 1973. (The Collected Writings of JMK, Volume VIII).
- KLIR, G. J. Uncertainty and information measures for imprecise probabilities: An overview. In: SIPPTA (Ed.). *1st. International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. Ghent, Belgium: The Society for Imprecise Probability and Their Applications, 1999.
- KOHLER, T. A.; CARR, E. Archaeological applications of GIS. In: JOHNSON, I.; NORTH, M. (Ed.). *Proceedings of Colloquium II, UISPP XIIIth Congress*. Forli, Italy: UISPP, 1997.
- KUHN, H. W. *Classics in Game Theory*. 1 ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1997. (Frontiers of Economic Research).
- KUHN, T. *A Estrutura Das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1978.
- KYDLAND, F. E.; PRESCOTT, E. C. The computational experiment: An econometric tool. , *Journal of Economic Perspectives*, v. 10, n. 1, p. 69–85, 1996.

- LANE, D.; MAXFIELD, R. Foresight, complexity and strategy. In: ARTHUR, W. B.; DARLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1997. (SFI - Studies on The Sciences of Complexity), p. 169–198.
- LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. *Fatos Florestais Da Amazônia - 2003*. Belém: Imazon, 2004.
- LIM, K. et al. Agent-based simulations of household decision making and land use change near altamira, brazil. In: GIMBLETT, H. R. (Ed.). *Integrating GIS and Agent-Based Modelling Techniques for Understanding Social and Ecological Processes*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- LIMA, E. et al. *Florestas Familiares: Um Pacto Sócio-Ambiental Entre Indústria Madeireira e Agricultura Familiar Na Amazônia*. Belém, PA: IPAM, 2003.
- LINDGREN, K. Evolutionary dynamics in game-theoretic models. In: ARTHUR, W. B.; DARLAUF, S. N.; LANE, D. A. (Ed.). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1997. (SFI - Studies on The Sciences of Complexity), p. 337–367.
- LOREK, H.; SONNENSCHNEIN, M. Object-oriented support for modelling and simulation of individual oriented ecological models. *Ecological Modelling*, v. 108, p. 77–96, jan 1997.
- MACHINA, M. J. Choice under uncertainty problems solved and unsolved. , *Economic Perspectives*, v. 1, n. 1, 1987.
- MARGULIS, S. *Causas Do Desmatamento Na Amazônia Brasileira*. Brasília: Banco Mundial, 2003.
- MARIANI, A. C. O mundo dos atores: Uma perspectiva de introdução à programação orientada a objetos. In: *Anais Do SBIE - Simpósio Brasileiro de Informática Na Educação*. Florianópolis, SC: SBC - Sociedade Brasileira de Computação, 1998.
- MAY, H. et al. *Barreiras À Certificação Florestal Na Amazônia Brasileira: A Importância Dos Custos*. [S.l.], Dezembro 2000.
- MAYNARD-SMITH, J. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982.
- MAYNARD-SMITH, J.; PRICE, G. R. The logic of animal conflict. *Nature*, v. 246, p. 15–18, 1973.
- MILLER, J. H. The coevolution of automata in the repeated prisoner's dilemma. *Journal of Economic Behavior and Organization*, Elsevier Science, v. 29, p. 87–112, 1996.

- MINAR, N. et al. *The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations*,. 1996. Santa Fe Institute, <http://www.santafe.edu/projects/swarm/overview.ps>.
- MINSKY, H. *Uncertainty and the Institutional Structure of Capitalist Economics*. 1996. Jerome Levy Economics Institute Working Paper, april, 1996.
- MMA, M. *Política Nacional de Florestas*. Brasilia: MMA, 2000.
- MONTEIRO, M. A. *Ibama Garante Que Exploração Ilegal Predomina*. Belém: [s.n.], 11, janeiro 2004. 9 p. Jornal O Liberal.
- NASH, J. F. The bargaining problem. *Econometrica*, v. 18, p. 155–162, 1950. In *Classics in Game Theory*, Princeton University Press, Princeton, 1997. Harold W Kuhn, ed.
- NASH, J. F. Two person cooperative games. *Econometrica*, v. 21, p. 128–140, 1953.
- NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. In: KUHN, H. W. (Ed.). *Classics in Game Theory*. Princeton: Princeton University Press, 1997. p. 48–49.
- NEPSTAD, D. C. et al. Large scale impoverishment of amazon forests by logging and fire. *Nature*, v. 398, p. 505–508, april 1999.
- NIEUWENHUYSE, A. et al. Can forestry be a competitive land use option? model simulation from humid tropical costa rica. *Forest Ecology and Management*, v. 137, p. 23–40, 2000.
- OSTROM, E. A behavioral approach to the rational choice theory of collective action. , *American Political Science Review*, v. 92, n. 1, p. 1–22, march 1998.
- PARKER, D. C. et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change; a review. *Annals of The Association of The american Geographers*, v. 93, n. 2, june 2003.
- PERIAUX, J. et al. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozle optimization problems. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 37, p. 417–429, 2001.
- POUNDSTONE, W. *Prisioner's Dilemma*. 1 ed. New York: Anchor Books - Doubleday, 1993.
- PURNOMO, H. *A Modelling Approach to Colaborative Forest Management*. Tese (Doutorado) — Posgraduate Program - Bogor Agricultural University, Bogor, Indonesia, may 2003.

- RAPOPORT, A. *Two Person Game Theory*. 4 ed. Mineola, NY: Dover (1st ed - University of Michigan Press), 1999. (Dover Books on Mathematics). 1st ed.1966.
- RESCHKE, C. H. Evolutionary perspectives on simulations of social systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*, v. 4, n. 4, October 2001.
- RIVERO, S. L. M. *Um Framework Para Simulação Econômica Baseado Em Sistemas Multiagentes Adaptativos Com Racionalidade Limitada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Agosto 1999.
- RIVERO, S. L. M.; STORB, B. H.; WAZLAWICK, R. S. Economic theory, anticipatory agents and artificial adaptive agents. *Brazilina Eletronic Journal of Economics*, v. 2, n. 2, Jun 1999. [Http://www.beje.decon.ufpe.br/rivero/rivero.htm](http://www.beje.decon.ufpe.br/rivero/rivero.htm).
- RONDÔNIA, G. D. E. D. *Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico*. 2002.
Disponível em: <<http://www.rondonia.gov.br>>.
- RONDÔNIA FIERO, F. D. I. D. E. de. *Perfil Sócio-Econômico e Industrial Do Estado de Rondônia*. Porto Velho, RO, 1997.
- RUBINSTEIN, A. Finite automata play the repeated prisoner's dilemma. *Journal of Economic Theory*, v. 39, p. 83–96, 1986.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A modern approach*. Upper Shadle River, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- SAMUELSON, L. *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*. [S.l.]: MIT Press, 1997.
- SARGENT, T. J. *Bounded Rationality in Macroeconomics*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- SCHOOMBIE, S. W.; GETZ, W. M. Evolutionary stable strategies and trade-offs in generalized beverton and holt growth models. *Theoretical Population Biology*, n. 53, p. 216–235, 1998.
- SEBRAE. *Cadastro Industrial SEBRAE/FIERO*. 1997.
- SELTEN, R. Reexamination of the perfectness concept of equilibrium points in extensive-form games. *International Journal of Game Theory*, v. 4, p. 25–55, 1975.
- SHACKLE, G. L. *Origens Da Economia Contemporânea: Invenção e Tradição No Pensamento Econômico (1926-1939)*. São Paulo: Hucitec, 1955.
- SHACKLE, G. L. *Uncertainty in Economics and Other Reflections*. Cambridge: Cambridge University Press, 1955.

- SILVA, L. C. D. *Desperdício de Madeiras Em Rondônia*. Dissertação (Mestrado) — Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- SIMON, H. *The sciences of the artificial*. [S.l.]: MIT Press, 1981.
- SMERALDI, R.; VERÍSSIMO, J. A. *Acertando O Alvo: Consumo de Madeira No Mercado Interno Brasileiro e Promoção Da Certificação Florestal*. Belém, PA: Amigos da Terra, IMAFLORA, AMAZON, 1999.
- SOARES-FILHO, B. *Modelagem Da Dinâmica de Paisagem de Uma Região de Fronteira de Colonização Amazônica*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1998.
- SOARES-FILHO, B. et al. Simulating the response of land use and land cover changes to governance along a major amazon highway: The case of the santarém-cuiabá corridor. In: *Health Ecosystems, Health People (Poster Abstracts)*. Washington, DC: International Society for ecosystems Health, 2002. p. 63. Health Ecosystems, Healt People Conference.
- STONE, S. W. *Growth of the timber industry in the Eastern Amazon: economic trends and implications for policy*. Tese (Doutorado) — Graduate Program in Resource Economics Cornell University, maio 1997.
- STONE, S. W. Evolution of timber industry along an aging frontier: the case of paragominas (1990-1995). *World Development*, v. 26, n. 3, p. 433–448, 1998.
- STONE, S. W. Using a geographic information system fot applied policy analysis of logging in eastern amazonia. *Ecological Economics*, n. 27, p. 43–61, 1998.
- TANG, F. F. Anticipatory learning in two persons game, some experimental results. *Journal of Economic Behavior and Organization*, v. 44, p. 221–232, 2001.
- TESFATSION, L. Agent-based computational economics: Modeling economies as complex adaptive systems. *Information Sciences*, v. 149, n. 4, p. 262–268, feb 2003.
- THÉBAUD, O.; LOCATELLI, B. Modelling the emergency of resource sharing conventions: an agent based approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4, n. 2, march 2001. Disponível em: <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASS/4/2/3.html>>.
- TROMBORG, E.; BUONGIORNO, J.; SOLBERG, B. The global timber market: Implications of changes in economic growth, timber supply and techological trends. *Forest Policy and Economics*, v. 1, p. 53–69, 2000.
- TVERSKY, A.; KAHNEMAN, D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, v. 183, p. 1124–1131, 1974.

- UHL, C. et al. Social, economic and ecological consequences of selective logging in an amazon frontier: The case of Tailândia. *Forest Ecology and Management*, n. 46, p. 243–273, 1991.
- VERÍSSIMO, A.; ARIMA, E.; LIMA, E. O diagnóstico do uso da terra na amazônia: Exploração madeireira, agricultura e agropecuária. In: VERÍSSIMO, A. et al. (Ed.). *Biodiversidade Na Amazônia Brasileira: Avaliação e Ações Prioritárias Para a Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios*. São Paulo, SP: ISA-Estação Liberdade, 2001. p. 327–337.
- VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P. *Preços Da Madeira Em Pé Em Pólos Madeireiros Próximos de Cinco Florestas Nacionais Da Amazônia*. Brasília, DF, 1999.
- VERÍSSIMO, A. et al. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old amazonian frontier: The case of paragominas. *Forest Ecology and Management*, Elsevier, n. 55, p. 169–199, 1992.
- VIEIRA, R. G. S. *Construção de Uma Interface KQML Em SmallTalk*. Dissertação (Mestrado) — Pós Graduação em Ciência da Computação - UFSC, 2000.
- VINCENT, T. L.; CRESSMAN, R. An ess maximum principle for matrix games. *Theoretical Population Biology*, n. 58, p. 173–186, 2000.
- VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press, 1944.
- WALKER, R. T.; SMITH, T. E. Land use transition and deforestation in developing countries. *Geographical Analysis*, v. 30, p. 8–30, 1993.
- WAZLAWICK, R. S. *Um Modelo Operatório Para a Construção de Conhecimento*. Tese (Doutorado) — Engenharia de Produção - UFSC, Florianópolis, 1993.
- WEIBULL, J. W. Evolution, rationality and equilibrium in games. *European Economic Review*, v. 92, p. 641–649, 1998.
- ZHU, S.; BUONGIORNO, J.; BROOKS, D. J. Effects of accelerated tariff liberalization on the forest products sector: A global modelling approach. *Forest Policy and Economics*, v. 2, p. 57–78, 2001.

*ANEXO I - Questionário
Aplicado na Amostra*

Questionario preliminar para serrarias

Data: _____

1 Nome da Empresa:

2 Endereco:

3. Informacoes de contato:

Nome:

Telefone:

Fax:

E-mail:

4 Ha quanto tempo a empresa esta em operacao? _____ anos

5 Quais sao os principais produtos da empresa?

Produto	Volume ano	Por dia (m3)	Dias trabalhados em 1 mês _____
Toras			
Madeira serrada			
Compensado			
Laminado			

7 Voce explora floresta? Sim / Nao

Se nao tem exploracao florestal, pular para questao 13:

8 De quem e a area de floresta que voce explora? Propria / Terceiro

Custo de aquisicao da terra em caso de exploracao em floresta propria: _____
por ha alq pta alqueiraoPagamento ao dono da terra em caso de exploracao em floresta de terceiro: _____
por ha alq pta alqueirao m3 tora ou arvore

9 Qual o seu custo de exploracao? R\$ _____/m3

10 Qual o volume de madeira explorado em 2002? _____ m3

11 Qual a volume madeira explorado por hectare? _____ m3 E mata mexida? _____

12 Voce transporta/ terceiriza o transporte da sua madeira? Custo (por m3): _____

13 Qual a distancia da serraria ate a floresta de onde vem as toras? _____ km

Quantos km sao asfaltados? _____ km

Qual a distancia da serraria ate a cidade? _____ km

14 Voce compra toras de terceiros? Sim / Nao Custo/m3 Nobre: _____
Vermelha: _____
Se compra e tem Extração, % de 3o. _____ Branca: _____

15 Volume de toras utilizado na serraria em 2002: _____ m3

16 Qual o custo de processamento da madeira em sua serraria? _____ /m3

17 Qual o volume de producao de madeira serrada em 2002: _____ m³

18 Duracao da epoca de colheita: _____ meses/ano

19 Funcionamento da serraria: _____ meses/ano

20 Quantos funcionarios voce tem no verao? _____
Custo mensal de mao-de-obra: R\$ _____

21 Quantos funcionarios voce tem no inverno? _____
Custo mensal de mao-de-obra: R\$ _____

22 Tecnologia na floresta

23 Tecnologia na serraria

Floresta			Serraria		
Equipamento	Quantidade	Idade media	Equipamento	Quantidade	Idade media
Motoserra			Motoserra		
Skidder			Carregadeira		
Esteira			Serra fita		
Carregadeira			Serra circular		
Caminhao			Multilamina		
Outro			Destopadeira		
			Plana		

Receita

24 Qual a porcentagem da madeira serrada por tipo?

Tipo	%
Exportacao	
Mercado interno	
Aproveitamento	

25 Qual o preco da madeira serrada por tipo?

Tipo	Preco (R\$/m ³)		
	Nobre	Vermelha	Branca
Exportacao			
Mercado interno			
Aproveitamento			

26 Qual o investimento total na empresa? R\$ _____

27 Já teve serraria em outros lugares?

Localidade	Estado	de (ano)	até (ano)	Dist. para atual (km)