

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ALOCAÇÃO ECONÔMICA DE RECURSOS NATURAIS NO
CONTEXTO DE BACIA HIDROGRÁFICA: APLICAÇÃO NA BACIA
DO RIO SANGÃO EM SANTA CATARINA**

ADRIANO DE PAULA FONTAINHAS BANDEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Antônio S. Louzada
Prof. Dr. José Carlos C. Amorim
Prof. Dr. Paulo Dabdab Waquil

IPH / UFRGS
Depto. Eng. Fort. e Construção / IME
Depto. Ciências Econômicas / UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ALOCAÇÃO ECONÔMICA DE RECURSOS NATURAIS NO
CONTEXTO DE BACIA HIDROGRÁFICA: APLICAÇÃO NA BACIA
DO RIO SANGÃO EM SANTA CATARINA**

ADRIANO DE PAULA FONTAINHAS BANDEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Antônio S. Louzada
Prof. Dr. José Carlos C. Amorim
Prof. Dr. Paulo Dabdab Waquil

IPH / UFRGS
Depto. Eng. Fort. e Construção / IME
Depto. Ciências Econômicas / UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2010

Agradecimentos

Ao Professor Carlos André Bulhões Mendes pela orientação e pela colaboração;

Aos professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela dedicação e pelo conhecimento transmitido;

Aos professores da Banca, José Antônio S. Louzada, José Carlos C. Amorim e Paulo Dabdab Waquil;

À Secretaria do IPH, com Nadir, Márcia, Andreas e Maurício, pela boa vontade e ajuda despendida durante os cursos de mestrado e doutorado;

Aos meus colegas do IPH pelo companheirismo e pela ajuda sempre benvinda;

Aos meus antigos chefes, Sr. Marco Antônio Vanni e Sra. Cristina Fleig Mayer, e aos atuais, Sr. Moisés Roberto Lanner Carvalho e Sr. Sérgio Luiz Felizardo Ribeiro, pelo apoio, sem o qual não teria sido possível a conclusão deste curso;

Aos meus amigos e familiares, por todo incentivo e amizade oferecida.

Aos meus pais, ao meu irmão, ao meu avô e a minha avó, ainda que distantes, sempre estiveram presentes, acreditando em mim;

À minha querida esposa Renata, que sempre está ao meu lado, me estimulando e incentivando e servindo de exemplo de dedicação e aplicação. Muito obrigado pelo seu amor e carinho.

RESUMO

Os impactos ambientais provocados pela exploração de recursos naturais podem causar prejuízos a terceiros já que a ação destes agentes sobre o meio prejudica e, em alguns casos, inviabiliza a existência de outras atividades. Nesse contexto, enquadram-se a mineração de carvão e agricultura de arroz irrigado. A mineração e o beneficiamento de carvão possibilitam o contato da água com resíduos formando a drenagem ácida de mina que, em grande parte dos casos, é despejada em cursos d'água adjacentes prejudicando outros usos da água. Já o cultivo de arroz irrigado exige a captação de grandes volumes de água, podendo causar escassez desse recurso. O desenvolvimento de ambas as atividades em uma mesma bacia hidrográfica acarreta elevada pressão sobre os recursos hídricos, tendo em vista que a captação para irrigação diminui a vazão nos cursos d'água, agravando a concentração dos contaminantes oriundos da mineração. Assim, o presente trabalho tem por objetivo elaborar uma metodologia de planejamento da alocação econômica de recursos naturais em bacias hidrográficas, buscando produção ótima tanto do minério quanto do cultivo com a internalização dos custos ambientais a fim de que os parâmetros de qualidade da água, estabelecidos pela Resolução 357 do CONAMA, sejam respeitados e, desse modo, diminua a incidência de prejuízos a terceiros. Tal metodologia é pautada na elaboração de um modelo capaz de simular, ao longo do tempo de planejamento, a carga de poluentes lançada nos cursos d'água e o volume de água captado de uma bacia hidrográfica, considerando a aleatoriedade das variáveis envolvidas. Após a coleta de dados, a implantação da metodologia se dá em quatro cenários. O primeiro deles é a análise da situação em que não há internalização dos custos ambientais. Constatou-se que os limites estabelecidos pelo CONAMA são ultrapassados. O segundo cenário caracteriza-se pela tentativa de enquadramento dos cursos d'água na classe 3, desconsiderando a possibilidade de outros usos da água. Dadas as condições de tratamento de efluentes, tal enquadramento é possível com a redução de 4,30% da renda gerada na bacia em relação ao caso base. O terceiro cenário diz respeito à tentativa de enquadramento na classe 3, reservando-se 20% da vazão disponível para outros usos. Os resultados mostram ser possível tal enquadramento, mas a elevação dos gastos com tratamento de efluentes provoca a redução de 1,84% da renda gerada em relação ao caso base. A imposição do tratamento ativo de efluentes à mineração para enquadramento na classe 1 determina o quarto cenário. Com o tratamento ativo, não há necessidade de alocação de água para as atividades mineiras. Dessa forma, alocou-se 48% da vazão disponível para a irrigação do arroz, ficando, portanto 52% da vazão total disponível para outros usos. Neste cenário, foi necessária uma redução de 9,55% do valor presente líquido das atividades da bacia em relação ao caso base.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica, Recursos Naturais, Otimização.

ABSTRACT

The environmental impacts caused by natural resources exploration may cause damages to third parties, since these agents' actions harm the environment and, in some cases, make the existence of other activities unfeasible. This context includes coal mining and irrigated rice cropping. Coal mining and beneficiation make possible the contact between water and coal waste generating acid mine drainage, which is dumped into adjacent rivers, in most cases, damaging other water uses. The cultivation of rice requires the capture of large volumes of water, causing the scarcity of this resource. The development of both activities in the same river basin causes high pressure on water resources because the capture for irrigation reduces the flow in rivers, exacerbating the concentration of contaminants from mining. Thus, this study aims to develop a methodology for planning the economic allocation of natural resources in river basins, seeking optimum production of both the ore and the cultivation with the internalization of environmental costs so that water quality parameters, established by CONAMA's Resolution 357, are respected and thereby decrease the incidence of damage to third parties. This methodology is based on the elaboration of a model which is able to simulate over the planning time, the load of pollutants released into water courses and the volume of water captured from a watershed, considering the randomness of the variables involved. After collecting data, the implementation of the methodology is given in four alternative cases. The first is the analysis of the situation in which there is no internalization of environmental costs. It was found that the limits established are exceeded. The second alternative case is characterized by the attempt of framing watercourses in Class 3, ignoring the possibility of other water uses. Given the conditions of wastewater treatment, such framing is possible with a reduction of 4.30% of the income generated in the basin over the base case. The third alternative concerns the attempt to frame rivers into class 3, reserving 20% of water flow available for other uses. The results show that such framing is possible, but the increase in wastewater treatment costs causes a reduction of 1.84% of the income generated in relation to the base case. The imposition of active effluent treatment to mining activities in order to frame waters into class 1 determines the last alternative. With active treatment, there is no need to allocate water to mining activities. Thus, 48% of the available water flow is allocated for rice crops irrigation, and therefore 52% of the total available water flow is reserved for other uses. In this alternative case, there is a 9.55% reduction, in relation to the base case, in net present value of the activities developed in the basin.

Keywords: River Basin, Natural Resources, Optimization.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS USADAS NO TEXTO

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CaO: Óxido de Cálcio

Carvão CE 4500: Carvão com poder calorífico de 4.500 kcal/kg.

CETEM: Centro de Tecnologia Mineral

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

DAM: Drenagem Ácida de Mina

DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EUA: Estados Unidos da América

Fe²⁺: Íon Ferroso

Fe³⁺: Íon Férrico

Fe(OH)₃: Hidróxido de Ferro

FeS₂: Sulfeto de Ferro

H⁺: Cátion Hidrogênio

H₂O: Água

H₃AsO₃: Ácido Arsenioso

H₃AsO₄: Ácido Arsênico

IRGA: Instituto Riograndense do Arroz

L: Litro

MCT: Ministério da Ciência e Tecnologia

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MME: Ministério das Minas e Energia

O₂: Oxigênio

OCDE: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

pH: Potencial Hidrogeniônico

ROM: *Run of Mine*

SIECESC: Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina

SO₄²⁻: Íon Sulfato

SOSBAI: Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

UNESC: Universidade do Extremo Sul Catarinense

VPL: Valor Presente Líquido

WCI: *World Coal Institute*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Abordagem do Problema	24
Figura 2: Evolução recente da produção mineral brasileira	27
Figura 3: Evolução histórica da área de lavouras no Brasil	28
Figura 4: Diferentes cargas de poluentes na bacia.	40
Figura 5: Meio ambiente como produtor de recursos e receptor de rejeitos.	55
Figura 6: Custo (D) em função do acúmulo de resíduos no meio ambiente (Z_t).....	64
Figura 7: Lucro (π) x quantidade produzida em um intervalo de tempo (Q_t).	66
Figura 8: Maximização do bem estar social.	67
Figura 9: Fluxograma metodológico.	69
Figura 10: Localização da área carbonífera.....	82
Figura 11: Classificação de uso do solo na área drenada pelo Rio Sangão.....	86
Figura 12: Localização dos postos fluviométricos na Bacia do Rio Araranguá.....	88
Figura 13: Correlograma da série histórica de vazões.....	92
Figura 14: Correlograma da série histórica de precipitações	92
Figura 15: Periodograma cumulativo da série histórica de vazões	93
Figura 16: Periodograma cumulativo da série histórica de precipitações	93
Figura 17: Médias e desvios mensais para a série de vazões	94
Figura 18: Médias e desvios mensais para a série de precipitações	94
Figura 19: Correlograma residual para a série de vazões.....	95
Figura 20: Correlograma residual para a série de precipitações.....	96
Figura 21: Comparação entre vazões sintéticas e históricas.....	98
Figura 22: Comparação entre precipitações sintéticas e históricas	98
Figura 23: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso base	110
Figura 24: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso base	111
Figura 25: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso base	112
Figura 26: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso base.....	112
Figura 27: Comportamento do VPL por setor.	113
Figura 28: Histograma dos VPL por setor no caso base.....	114
Figura 29: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso base	115
Figura 30: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso base.....	116
Figura 31: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso base	117
Figura 32: Conc. média de SO_4 na água alocada para os agentes mineiros no caso base	118

Figura 33: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso base	119
Figura 34: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base ..	120
Figura 35: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso base .	121
Figura 36: Conc. média de SO ₄ nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base	122
Figura 37: Conc. média de SO ₄ nos pontos de captação para irrigação no caso base	122
Figura 38: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base .	123
Figura 39: Conc. média de Mn nos pontos de captação para irrigação no caso base.....	123
Figura 40: Conc. média de contaminantes no exutório da bacia no caso base.....	124
Figura 41: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso base	125
Figura 42: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso base.....	125
Figura 43: Fluxo de caixa setorial no caso base	126
Figura 44: Variação do VPL de mineradores com a vazão disponível no caso base	127
Figura 45: Variação do VPL de agricultores com o percentual da vazão disponível.....	128
Figura 46: Variação do VPL setorial com o percentual da vazão disponível no caso base ...	128
Figura 47: Variação do VPL de mineradores com a reserva de carvão no caso base	129
Figura 48: Variação do VPL setorial com a reserva de carvão disponível no caso base	130
Figura 49: Variação do VPL com a área plantada (em hectares) na bacia (caso base).....	131
Figura 50: Variação do VPL de mineradores com o preço do carvão no caso base	132
Figura 51: Variação do VPL setorial com o preço do carvão no caso base	132
Figura 52: Variação do VPL de agricultores com o preço do arroz no caso base.....	133
Figura 53: Variação do VPL setorial com o preço do carvão no caso base	133
Figura 54: Variação do VPL total com os preços do carvão e do arroz no caso base.....	134
Figura 55: Conc. de Fe para as usinas 1 e 2 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base	135
Figura 56: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base	136
Figura 57: Conc. de Fe para as Minas 5 e 10 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base	137
Figura 58: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 1	139
Figura 59: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 1	140
Figura 60: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 1	141
Figura 61: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 1	141
Figura 62: Comportamento do VPL por setor no caso 1	142
Figura 63: Histograma dos VPL por setor no caso 1.....	142
Figura 64: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 1	143
Figura 65: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 1.....	144
Figura 66: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso 1.....	145

Figura 67: Conc. média de SO ₄ na água alocada para os agentes mineiros no caso 1	146
Figura 68: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso 1	146
Figura 69: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1	147
Figura 70: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1	148
Figura 71: Conc. média de SO ₄ nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1	148
Figura 72: Conc. média de SO ₄ nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1....	149
Figura 73: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1	149
Figura 74: Conc. média de Mn nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1....	150
Figura 75: Concentração média de contaminantes no exutório da bacia.	150
Figura 76: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 1	151
Figura 77: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso 1	152
Figura 78: Fluxo de caixa setorial no caso 1	152
Figura 79: Conc. de Fe para as usinas 1 e 2 com Q _{disp} =100%Q _{exut} no caso 1	153
Figura 80: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com Q _{disp} =100%Q _{exut} no caso 1	154
Figura 81: Concentração de ferro para as Minas 5 e 10 com Q _{disp} =100%Q _{exut} no caso 1 .	155
Figura 82: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 2	158
Figura 83: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 2	159
Figura 84: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 2	160
Figura 85: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 2	160
Figura 86: Comportamento do VPL por setor no caso 2	161
Figura 87: Histograma dos VPL por setor no caso 2	161
Figura 88: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 2	162
Figura 89: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 2	163
Figura 90: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso 2	164
Figura 91: Conc. média de SO ₄ na água alocada para os agentes mineiros no caso 2	165
Figura 92: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso 2	165
Figura 93: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2	166
Figura 94: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2	167
Figura 95: Conc. média de SO ₄ nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2	168
Figura 96: Conc. média de SO ₄ nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2....	168
Figura 97: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2	169
Figura 98: Conc. média de Mn nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2	169
Figura 99: Concentração média de contaminantes no exutório da bacia no caso 2	170
Figura 100: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 2	171

Figura 101: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.....	171
Figura 102: Fluxo de caixa setorial no caso 2	172
Figura 103: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com $Q_{disp}=80\%Q_{exut}$ no caso 2	173
Figura 104: Conc. de Fe para as Minas 5 e 10 com $Q_{disp}=80\%Q_{exut}$ no caso 2	174
Figura 105: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 3.....	177
Figura 106: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 3	178
Figura 107: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 3	178
Figura 108: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 3.....	179
Figura 109: Comportamento do VPL por setor no caso 3.....	179
Figura 110: Histograma dos VPL por setor no caso 3.....	180
Figura 111: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 3	181
Figura 112: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 3.....	182
Figura 113: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 3	183
Figura 114: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso 3.....	183
Figura 115: Fluxo de caixa setorial no caso 3	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das águas doces	30
Tabela 2: Princípios de planejamento e gestão de recursos hídricos.....	37
Tabela 3: Contaminante objeto do tratamento.....	48
Tabela 4: Demanda hídrica do arroz.....	53
Tabela 5: Períodos favoráveis para semeadura do arroz irrigado em Santa Catarina	54
Tabela 6: Variáveis de entrada do modelo.	70
Tabela 7: Bacias hidrográficas localizadas na área carbonífera	82
Tabela 8: Agentes considerados na área drenada pelo Rio Sangão.....	87
Tabela 9: Estações fluviométricas pertencentes à Bacia do Rio Araranguá.....	87
Tabela 10: Vazões médias mensais na estação Forquilha em m ³ /s.....	89
Tabela 11: Precipitações totais mensais na estação Forquilha em mm	90
Tabela 12: Composição da DAM nas minas da bacia do Rio Araranguá	99
Tabela 13: Padrão para corpo d'água classe 1	99
Tabela 14: Padrão para corpo d'água classe 3.....	100
Tabela 15: Participação do custo de capital no total gasto com tratamento	102
Tabela 16: Tratamentos, custos e reminiscência de metais.....	103
Tabela 17: Variáveis gerais do modelo	104
Tabela 18: Variáveis de entrada relativas à mineração	104
Tabela 19: Variáveis de entrada relativas à agricultura.....	105
Tabela 20: Relação entre as áreas de drenagem	106
Tabela 21: Alocações de recursos hídricos no caso base	108
Tabela 22: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso base.....	109
Tabela 23: VPL – média e desvio padrão por setor no caso base	109
Tabela 24: VPL de agentes mineiros no caso base.....	127
Tabela 25: VPL de agentes agrícolas	128
Tabela 26: VPL por setor de atividade econômica no caso base.....	129
Tabela 27: Alocação ótima de recursos hídricos no caso 1	138
Tabela 28: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 1	139
Tabela 29: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 1.....	139
Tabela 30: Alocação ótima de recursos hídricos no caso 2.....	156
Tabela 31: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 2	157

Tabela 32: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 2.....	157
Tabela 33: Alocação de recursos hídricos no caso 3.....	175
Tabela 34: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 3.....	176
Tabela 35: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 3.....	176
Tabela 36: Comparação entre VPL de cada cenário analisado	184
Tabela 37: Comparação entre VPL de cada agente instalado na bacia	185

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	17
1.2 QUESTÃO DE PESQUISA E HIPÓTESE TESTADA.....	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo Geral.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
1.4 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	21
1.4.1 Contexto Institucional.....	23
1.4.2 Contexto da Sociedade e das Empresas.....	23
1.5 ABRANGÊNCIA E DELIMITAÇÃO DE TÓPICOS ENVOLVIDOS.....	24
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 SÍNTESE DA EXPLORAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS MINERAIS E AGRÍCOLAS NO BRASIL.....	26
2.1.1 Aspectos Econômicos.....	26
2.1.2 Aspectos Legais.....	30
2.2 PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	32
2.2.1 Visão Geral	32
2.2.2 Abordagem Atual	32
2.2.3 Princípios Fundamentais	36
2.3 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO DE USO DOS RECURSOS NATURAIS	37
2.4 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO E DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CARVÃO MINERAL.....	41
2.4.1 Tecnologia de Produção	41
2.4.2 Drenagem Ácida de Mina (DAM)	43
2.4.3 Formação dos Impactos da Mineração em Corpos Hídricos	45
2.4.4 Tecnologia de Manejo de Resíduos.....	46
2.5 SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ E DEMANDA HÍDRICA.....	49
2.5.1 Sistema Convencional	49
2.5.2 Sistema de Cultivo Mínimo	50
2.5.3 Sistema de Plantio Direto	50
2.5.4 Sistema Pré-germinado	51
2.5.5 Sistema Mix	52
2.5.6 Sistema de Transplante de Mudas	52
2.5.7 Demanda Hídrica do Arroz	52
2.6 ECONOMIA DOS RECURSOS NATURAIS	54
2.6.1 Aspectos Gerais.....	55
2.6.2 Exploração Sustentável de Recursos Naturais Renováveis	56
2.6.3 Exploração Sustentável de Recursos Naturais Não Renováveis.....	60
2.7 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	67

3 METODOLOGIA.....	69
3.1 OBTENÇÃO DE DADOS.....	70
3.1.1 Dados da Bacia.....	70
3.1.2 Dados Geográficos.....	72
3.1.3 Dados Agrícolas.....	72
3.1.4 Dados Relacionados à Exploração do Carvão Mineral.....	73
3.1.5 Dados Relacionados ao Tratamento de Efluentes.....	73
3.2 CONSTRUÇÃO DE FUNÇÕES ECONÔMICAS E DE EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO.....	74
3.2.1 Funções Econômicas da Mineração de Carvão.....	74
3.2.2 Funções Econômicas da Cultura de Arroz Irrigado.....	77
3.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	78
3.4 RESULTADOS.....	79
3.5 ANÁLISE DE CENÁRIOS.....	80
4 ÁREA DE ESTUDO.....	81
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	81
4.2 A ECONOMIA DA REGIÃO.....	83
4.3 A SUB-BACIA DO RIO SANGÃO.....	84
4.3.1 Dados geográficos da sub-bacia do Rio Sangão.....	84
4.3.2 Dados hidrometeorológicos da sub-bacia do Rio Sangão.....	87
4.3.3 Geração de dados hidrológicos aleatórios.....	91
4.3.4 Condições de qualidade da água.....	98
4.3.5 Dados relacionados à exploração e ao beneficiamento de carvão mineral.....	100
4.3.6 Dados relacionados ao tratamento de efluentes.....	101
4.3.7 Dados relacionados à cultura de arroz irrigado.....	103
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	104
5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO.....	104
5.2 FORMATO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	107
5.3 O CASO BASE: SEM TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	107
5.3.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos.....	108
5.3.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido.....	109
5.3.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais.....	114
5.3.4 Comportamento da Qualidade da Água.....	116
5.3.5 Comportamento do Fluxo de Caixa.....	124
5.3.6 Análise de Sensibilidade.....	126
5.4 CASO 1: ENQUADRAMENTO NA CLASSE 3 COM 100% DA VAZÃO DISPONÍVEL.....	137
5.4.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos.....	138
5.4.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido.....	138
5.4.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais.....	143
5.4.4 Comportamento da Qualidade da Água.....	144
5.4.5 Comportamento do Fluxo de Caixa.....	151
5.4.6 Análise de Sensibilidade.....	152

5.5 CASO 2: ENQUADRAMENTO NA CLASSE 3 COM 80% DA VAZÃO DISPONÍVEL	156
5.5.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos	156
5.5.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido.....	157
5.5.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais.....	162
5.5.4 Comportamento da Qualidade da Água.....	163
5.5.5 Comportamento do Fluxo de Caixa	170
5.5.6 Análise de Sensibilidade	172
5.6 CASO 3: IMPOSIÇÃO DO TRATAMENTO ATIVO DE EFLUENTES À MINERAÇÃO.....	174
5.6.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos	175
5.6.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido.....	175
5.6.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais.....	180
5.6.4 Comportamento da Qualidade da Água.....	182
5.6.5 Comportamento do Fluxo de Caixa	182
5.6.6 Análise de Sensibilidade	184
5.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS	184
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	187
6.1 SÍNTESE DO TRABALHO.....	187
6.2 CONCLUSÃO	188
6.3 LIMITAÇÕES E PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS	190
REFERÊNCIAS	192

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se a relevância do estudo, as hipóteses e questões da pesquisa e os objetivos gerais e específicos. Justifica-se a escolha do tema e dos objetivos e detalham-se a abrangência e a delimitação dos tópicos envolvidos no estudo. Ao fim do capítulo, é apresentada a estrutura do trabalho.

1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Pode-se dizer que a escassez de água não está relacionada apenas com fenômenos meteorológicos, mas também com a forma pela qual esse recurso é utilizado. O aparecimento de novas atividades aliado à expansão daquelas existentes em determinada região provoca acréscimos na demanda por seus recursos naturais, dentre os quais se destaca a água.

A pressão pela utilização de um recurso natural por diferentes atividades leva, em alguns casos, ao seu esgotamento. Hardin (1968) cita um exemplo de esgotamento de um recurso natural causado pelo uso sem planejamento, denominado “A Tragédia dos Comuns”. O recurso em questão é um campo, sem propriedade definida, onde a população leva seu rebanho para pastar. O problema começa a tomar forma à medida que cada pastor resolve ampliar seu rebanho, pois seu incremento lhe acarreta um benefício maior que o dano causado pela redução da disponibilidade de pasto, já que este último é repartido por todos os pastores. Por se tratar de um recurso finito, à medida que os pastores levavam mais animais ao campo, uma menor área de pasto restava a todos. Sem o adequado planejamento de uso, o recurso se esgotou causando danos aos próprios pastores e, também, à sociedade pela perda da renda gerada pela atividade.

Nesse caso, pode-se, ainda, dizer que o excesso de animais de um pastor provocou efeitos adversos na atividade econômica de outro pastor e na sociedade em que todos vivem.

O esgotamento do recurso, entretanto, não se dá apenas por sua exploração incessante, mas também pela poluição do ambiente natural. Jager *et al* (2000) acreditam que a relação humana com o ecossistema apresenta duas faces. Por um lado, depende-se do ecossistema como fonte de recursos para alimentação, desenvolvimento de materiais e manutenção de um ambiente saudável para viver. Por outro lado, a humanidade polui o

ambiente natural, pois dele também depende para disposição de resíduos de suas atividades. No entanto, tal procedimento pode levar à deterioração dos recursos naturais.

A preocupação com o esgotamento de recursos naturais surgiu com o incremento populacional verificado a partir do séc. XVIII. Norton (1984) destaca que os economistas foram pioneiros em tratar a depleção dos recursos naturais. No fim do séc. XVIII e início do séc. XIX, Malthus, Ricardo e Mill concluíram que a escassez de recursos naturais poderia levar à diminuição de renda e, em consequência, à redução da atividade econômica. Para Malthus (1789), a disponibilidade de terra era um fator responsável pela limitação da capacidade de alimentação de uma crescente população. Ricardo (1817) reconhecia a diferença entre os tipos de solo e defendia a tese de que melhores solos eram ocupados antes dos piores, provocando um processo de crescentes custos marginais. Segundo Mill (1848), a produção de recursos poderia ser mantida ou, até mesmo, melhorada em caso de desenvolvimento tecnológico.

Dada a população atual e sua pressão sobre os recursos naturais, é importante que a exploração desses recursos ocorra de forma planejada, visando que sejam evitados danos entre produtores e consumidores. Quando uma ação de um produtor ou consumidor tem influência sobre outros produtores ou consumidores, sem que seja levada em consideração na fixação do preço de mercado, diz-se que ocorreu uma externalidade. Esta pode ser positiva, quando o efeito é benéfico, ou negativa, caso contrário (PINDYCK; RUBINFELD, 2002).

No que se refere à utilização dos recursos hídricos, sabe-se que a água passa por um ciclo biogeoquímico que envolve chuva, absorção, escoamento superficial e subsuperficial, além da evapotranspiração, que interrelaciona as atividades a ela ligadas, possibilitando a ocorrência de externalidades (RODRIGUEZ, 1998). A ocorrência de externalidades é agravada por ser a água considerada, em ambiente rural, um bem público, ou seja, aquele cujos consumidores não sofrem restrição para consumir e cujo custo de ampliação do consumo é nulo. Em áreas urbanas, após tratamento e distribuição, ressalta-se que não mais se considera a água um bem público.

Assim surgem conflitos pelo seu uso, protagonizados por empreendedores interessados em diluir resíduos de suas atividades ou em usar a água em determinada fase de seu processo de produção, pela população, interessada no seu abastecimento, no despejo dos resíduos domésticos e por agentes interessados em usos diversos que vão desde a manutenção

do funcionamento do ecossistema aquático até atividades como recreação, transporte, geração de energia, entre outras.

A fim de atender a todos os agentes e, assim, prover desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental, é imprescindível um planejamento de uso dos recursos hídricos que considere como unidade territorial a bacia hidrográfica em questão e que defina direitos e responsabilidades, fazendo com que todos os custos sejam internalizados. O planejamento inadequado ou sua não execução pode levar ao esgotamento dos corpos d'água, causando prejuízo a todos os agentes envolvidos.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA E HIPÓTESE TESTADA

Com base no contexto apresentado, pode-se concluir que a exploração econômica de recursos naturais necessita de cuidados extremos a fim de que não seja uma fonte de problemas ambientais. No entanto, face à necessidade de crescimento econômico em determinadas regiões brasileiras, à disponibilidade de tecnologia nacional, ao bom desempenho do agronegócio brasileiro, à importância da exportação de *commodities* para a balança comercial brasileira e à ainda necessária utilização de combustíveis fósseis para geração de energia, é urgente que tais atividades sejam implantadas de maneira sustentável.

Assim sendo, coloca-se a seguinte questão:

“É viável a exploração econômica de recursos naturais renováveis e não renováveis em face de condicionantes hídricos (qualitativos e quantitativos) em bacias hidrográficas?”

A fim de estabelecer as condições necessárias para o desenvolvimento da atividade de exploração econômica de recursos naturais apresenta-se a seguinte hipótese:

A incorporação das externalidades causadas pela exploração de recursos naturais renováveis e não renováveis, em um contexto de planejamento e gestão dos Recursos Hídricos, é capaz de acarretar a qualificação no manejo da bacia hidrográfica.

Os seguintes efeitos podem ser considerados externalidades decorrentes do uso de recursos naturais:

- Alteração do regime fluvial caracterizada por vazões insuficientes ou incapazes de manter a diversidade biológica do ecossistema a jusante;
- Falta de disponibilidade hídrica, devido ao uso de água para irrigação e à implantação de outras atividades necessárias ao desenvolvimento econômico regional;
- Alteração da qualidade das águas superficiais devido à sua contaminação por substâncias oriundas da atividade de mineração (drenagem ácida de mina).

A alocação de recursos naturais renováveis no tempo e no espaço refere-se à distribuição da água disponível, à produção de bens agrícolas e à extração de minério tendo em vista a necessidade de internalização das externalidades.

1.3 OBJETIVOS

A apresentação do objetivo geral do presente estudo é sucedida da apresentação de objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo geral responder à questão de pesquisa e pode ser enunciado da seguinte forma:

- Propor uma metodologia de exploração de recursos naturais que aborde a incorporação das externalidades, no contexto do planejamento e da gestão dos Recursos Hídricos.

1.3.2 Objetivos Específicos

É apresentada uma sistemática de análise que aborde a atenuação das externalidades causadas pela poluição das fontes de recursos hídricos por parte da atividade de exploração de recursos minerais e daquelas causadas pela captação de água para irrigação de cultivos. Ilustra-se sua aplicação por meio de um estudo de caso prático.

Para isso, é desenvolvido um modelo matemático de otimização capaz de planejar o uso dos recursos hídricos, configurado pela diluição de resíduos oriundos da mineração e pela captação de água para irrigação, considerando a capacidade de absorção de cargas da bacia hidrográfica e a necessidade de manutenção de uma vazão remanescente.

Dessa forma, destacam-se como objetivos específicos os seguintes pontos:

- Identificação de uma fundamentação teórica para entender os principais fatores que influenciam o processo de produção dos recursos naturais, bem como o uso dos Recursos Hídricos relacionado a tais atividades;
- Identificação das principais tecnologias de tratamento de efluentes;
- Identificação da demanda hídrica e da produtividade a ela associada para os cultivos praticados na bacia;
- Desenvolvimento de um modelo de planejamento e gestão do uso da água com o objetivo de maximizar o bem estar social;
- Aplicação e validação do modelo em estudo de caso prático;
- Análise de resultados quanto à eficiência, precisão, praticidade e aplicabilidade em outras bacias.

1.4 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

Conforme apresentado, a exploração de recursos naturais não renováveis acarreta conflitos pelo uso da água, na maioria das vezes, por não se dispor de tratamento adequado. Em paralelo, a captação de água bruta para irrigação diminui a capacidade de dissolução das cargas oriundas da mineração, agravando os conflitos.

Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo estabelecer um mecanismo econômico para induzir o controle da descarga da drenagem ácida de mina (DAM) e a redução do desperdício de água inerente à agricultura irrigada, usando como estudo de caso a Bacia do Rio Sangão no estado de Santa Catarina. Em tal bacia, coexistem as atividades de mineração de carvão e de cultivo de arroz. Realiza-se a maximização da renda de todos os

empreendimentos (mineiros e agrícolas) localizados na mesma bacia hidrográfica, considerando as restrições impostas pelos limites toleráveis da concentração de poluentes nos cursos d'água, pelo balanço de massa e pela manutenção de uma vazão remanescente.

Convém salientar que o simples aumento de renda verificado em determinada região pode ser responsável por um incremento no padrão de qualidade ambiental. Yandle *et al* (2002) registram que em países da OCDE foi verificado que à medida que a renda per capita se elevava, o ambiente sofria uma contínua deterioração até atingir um ponto máximo. A partir desse ponto, a elevação da renda era responsável pela melhoria dos padrões de qualidade ambiental. Segundo o autor, o fato se deve à maior disposição das pessoas a pagar por uma melhor qualidade de vida. O gráfico correspondente à situação descrita é conhecido como Curva Ambiental de Kuznets.

A análise da questão pelo lado econômico permite dizer que há uma imperfeição no mercado toda vez que for verificada a presença de uma externalidade, seja ela negativa ou positiva. No caso em questão, a descarga de DAM é uma externalidade negativa que deve ser corrigida, pois aponta para uma falha no mercado da mineração de carvão. Por outro lado, a captação de água para irrigação, provocando a falta desse recurso para as demais atividades é a principal externalidade negativa causada pelas culturas de arroz.

Como forma de corrigir imperfeições no mercado, Pindyck e Rubinfeld (2002) apontam três alternativas: o estabelecimento de um padrão de emissão de poluentes, a arrecadação de uma taxa (*green tax*) sobre o poluente emitido e a distribuição de permissões transferíveis.

O incentivo econômico utilizado no presente trabalho pode ser entendido como a permissão para uso de uma quantidade máxima de água por cada um dos agentes estabelecidos na bacia hidrográfica, quer para dissolução de cargas poluentes, quer para irrigação. No entanto, a fixação de preços de tais permissões não é abordada, impossibilitando que seja considerada a transferência de tais permissões entre os agentes.

Salienta-se que não é considerada no modelo a contaminação das águas subterrâneas por DAM, nem a exploração de aquíferos subterrâneos para irrigação. Isto se deve à complexidade de medição da poluição dos aquíferos e à dificuldade de redução dos níveis de

poluição do subsolo. Recomenda-se, no entanto, que, em estudos posteriores, seja verificada a dinâmica hidrogeológica da região para que se possa incluir o devido custo de tratamento.

Assim, são listadas as seguintes justificativas para a realização da pesquisa:

1.4.1 Contexto Institucional

a) contribuição para um possível fortalecimento dos Comitês de Bacias Hidrográficas como cenários de discussões e debates acerca do planejamento de uso e da gestão dos recursos hídricos, já que a bacia se constitui em unidade de estudo;

b) ênfase na necessidade de monitoramento de dados relacionados ao uso da água, fortalecendo órgãos públicos responsáveis;

c) ratificação da necessidade de emprego de pessoal qualificado para que o Comitê de Bacia desenvolva e seja capaz de aplicar estudos técnicos.

É importante que se busque entender que, apesar de ser possível que uma mesma empresa possua os direitos de operação de mais de uma mina, estas minas podem estar a exercer pressão sobre a mesma bacia hidrográfica e, no uso dos recursos hídricos, são competidoras. Assim como um determinado empreendedor agrícola pode ser arrendatário de terras descontínuas em uma mesma bacia. Dessa forma, faz-se necessária uma arena de discussões, na qual se deve incluir a sociedade, para que a competição não se configure em prejuízo a todos.

1.4.2 Contexto da Sociedade e das Empresas

A realização desta pesquisa permitirá aos empreendedores inteirar-se sobre a situação dos custos ambientais internalizados no controle da poluição e determinar quais os fatores críticos para esta implantação, bem como suas vantagens e desvantagens. Em relação à sociedade, ressalta-se a importância de se perceber que um recurso escasso, no caso a água, não deve ser tratado somente como um bem público sob pena de se perder o benefício que se pode obter pela manutenção de determinados parâmetros de qualidade da água.

1.5 ABRANGÊNCIA E DELIMITAÇÃO DE TÓPICOS ENVOLVIDOS

A análise do problema apresentado requer a aplicação de conceitos relacionados à economia, às engenharias de minas e agrícola e à pesquisa operacional no contexto do planejamento de uso dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. A figura 1 exemplifica a abordagem do problema.

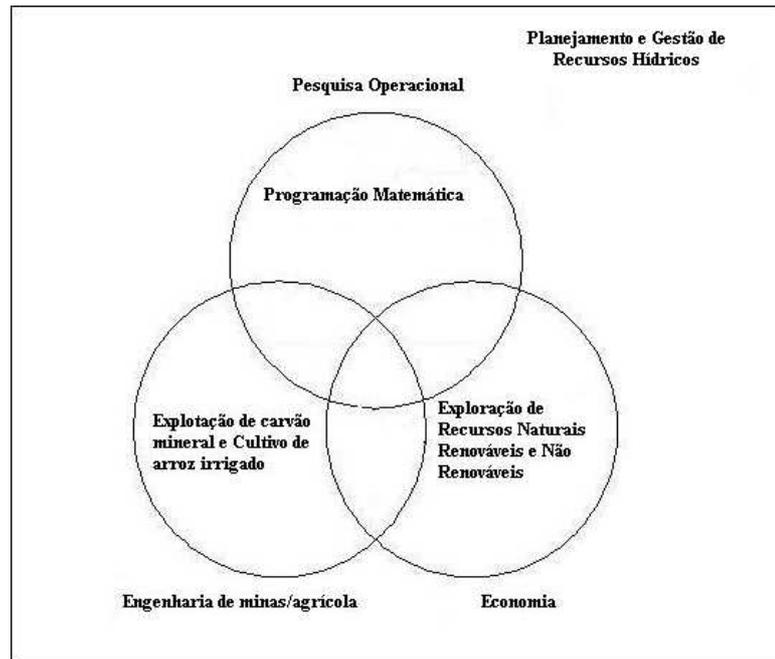


Figura 1: Abordagem do Problema

À economia cabe a teoria da exploração dos recursos naturais renováveis e não-renováveis. Na exploração de um recurso natural devem ser consideradas suas características e condições de ocorrência. No caso de recursos renováveis são consideradas as taxas de reposição do recurso. Para recursos não renováveis, no entanto, não há reposição e suas reservas, por serem finitas, podem vir a se esgotar. Assim sendo, são consideradas as quantidades do recurso disponíveis para extração, isto é, o tamanho das reservas.

A elaboração do modelo de otimização e o algoritmo para sua resolução são conceitos de programação matemática que têm relevante emprego pela pesquisa operacional.

A engenharia de minas se faz presente com a indicação das possíveis tecnologias de extração de carvão mineral e seus custos. Seus conceitos também se aplicam no que diz respeito às tecnologias de redução das emissões de poluentes e custos associados. A engenharia agrícola indica as possíveis tecnologias de plantio e cultivo de arroz. A

produtividade da cultura bem como sua demanda hídrica também são informações por ela fornecidas.

O contexto de planejamento de uso de recursos hídricos é evidenciado, sobretudo, na consideração da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e na preocupação com a manutenção de uma vazão remanescente.

A intersecção de todos os conceitos acima referidos será aplicada no estudo de caso em área carbonífera onde as mineradoras estão sob supervisão do Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC, 1996) e onde também há cultivo de arroz irrigado. Constatou-se, ainda, na área a presença de suinocultura e de uso da água para lançamento de esgoto doméstico.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui, além deste capítulo introdutório, mais cinco capítulos. A revisão bibliográfica é o capítulo seguinte e apresenta a fundamentação teórica para o desenvolvimento do estudo. Com base nessa revisão, o capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida para o teste da hipótese de estudo. A área de estudo é apresentada no capítulo 4 com destaque para sua hidrografia. O capítulo 5 traz os resultados obtidos, considerando a aplicação da metodologia na área de estudo. No capítulo 6 são apresentados os comentários finais e a conclusão.

O Anexo 1 constitui-se em rotinas computacionais utilizadas e desenvolvidas para a implementação do algoritmo de otimização. Tal algoritmo foi implementado no *software* de computação técnica MATLAB, versão R2006b, com apoio do “Manual do Usuário para Ferramentas de Otimização” (*Optimization Toolboxes – User’s Guide*, 2010).

Por fim, são relacionadas as fontes de referência do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica julgada necessária à elaboração de uma metodologia para exploração de recursos naturais no âmbito de bacias hidrográficas. Para isso, apresenta-se a situação da exploração de recursos naturais no Brasil. Em seguida, trata-se da tendência do planejamento e da gestão dos recursos hídricos apontando seus princípios fundamentais. Justifica-se o uso da Bacia Hidrográfica como unidade territorial de estudo. São apresentadas as tecnologias de produção e tratamento de resíduos de carvão mineral e os sistemas de cultivo de arroz. Em seguida, são destacadas as teorias econômicas para exploração de recursos naturais renováveis e não renováveis. Em item posterior são descritos os principais métodos de otimização adotados na área de Recursos Hídricos.

2.1 SÍNTESE DA EXPLORAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS MINERAIS E AGRÍCOLAS NO BRASIL

O presente tópico apresenta a situação brasileira no que diz respeito aos aspectos econômicos e legais da exploração de recursos naturais.

2.1.1 Aspectos Econômicos

Desde o Período Colonial, os governos centrais no Brasil estiveram preocupados, de alguma forma, com a busca e o aproveitamento dos recursos minerais. Tais recursos contribuíram com a geração de divisas para a economia nacional, com a ocupação territorial e, assim, fizeram e fazem parte da história brasileira.

O subsolo brasileiro possui importantes depósitos minerais. Algumas dessas reservas são consideradas expressivas em termos mundiais. O Brasil produz cerca de 70 substâncias, sendo 21 do grupo de minerais metálicos, 45 dos não-metálicos e quatro dos energéticos (FARIAS, 2002).

De acordo com o IBRAM (2009), em 2008 a Produção Mineral Brasileira alcançou R\$ 51 bilhões, um aumento de 11% se comparado a 2007, excluídos Petróleo e Gás. Considerando a Indústria da Mineração e Transformação Mineral, o valor da Produção Mineral Brasileira alcançou R\$ 152 bilhões, um valor 13% maior do que em 2007 (R\$ 134 bilhões). A figura 2 ilustra a tendência crescente da atividade no Brasil.

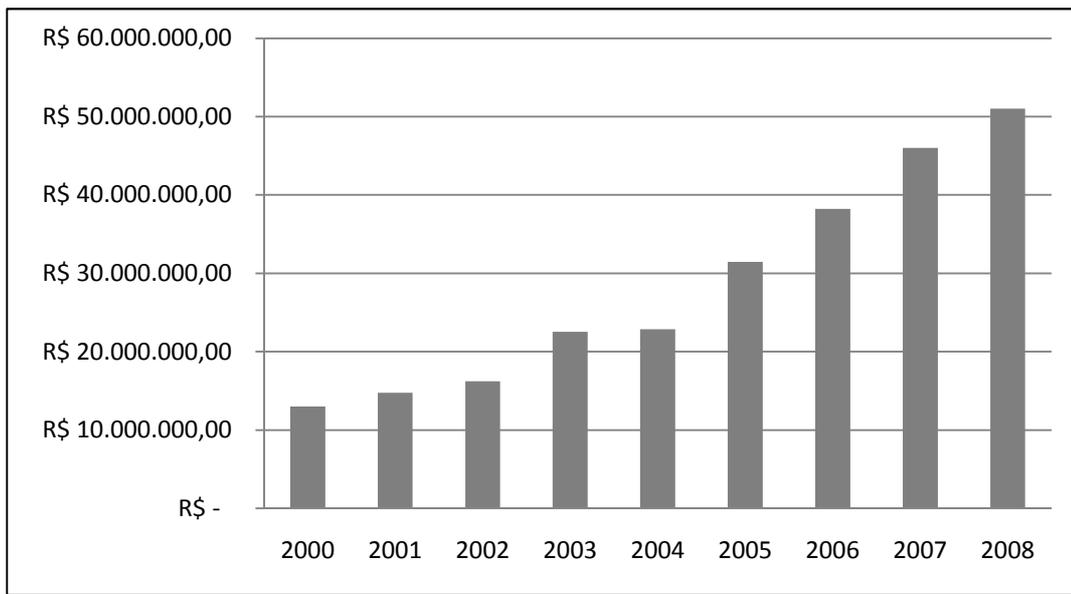


Figura 2: Evolução recente da produção mineral brasileira

O crescimento da mineração brasileira traz consigo impactos ambientais, dentre os quais podem ser destacados os seguintes: alteração do nível do lençol de água subterrâneo, poluição sonora, visual, da água, ar e solo, impactos sobre a fauna e a flora, assoreamento, erosão, movimentação de terra, instabilidade de taludes, encostas e terrenos em geral, lançamento de fragmentos e vibrações (BARRETO, 2001).

De todas as atividades mineradoras, merece especial atenção a extração de carvão mineral. A indústria do carvão se caracteriza pela infraestrutura reduzida e pelo uso intensivo de equipamentos. As jazidas de carvão podem estar na superfície (a céu aberto) ou localizadas a centenas de metros de profundidade (subterrâneas): de sua localização depende a forma de extração. Os principais impactos ambientais relacionados à extração do carvão são: drenagem ácida das minas, que polui tanto águas superficiais como subterrâneas; degradação do solo devido ao acúmulo dos resíduos da mineração; contaminação de áreas urbanas e rurais;

poluição do ar; perda de reservas de água em razão do acúmulo dos resíduos do carvão; e impacto visual (BARRETO, 2001).

Em paralelo a agricultura brasileira também se mostra em crescimento, sendo também importante atividade geradora de divisas para o País. Principalmente a partir da década de 70 do séc. XX, o chamado agronegócio passou a ocupar posição de destaque no processo de desenvolvimento brasileiro, possibilitando o provimento de alimentos para a crescente população urbana, oferecendo matéria prima para a agroindústria e movimentando a indústria de insumos e o setor de prestação de serviços (EMBRAPA, 2003). A figura 3 mostra a evolução da área de lavouras no Brasil (IBGE, 2006). Destaca-se o rápido crescimento em anos recentes.

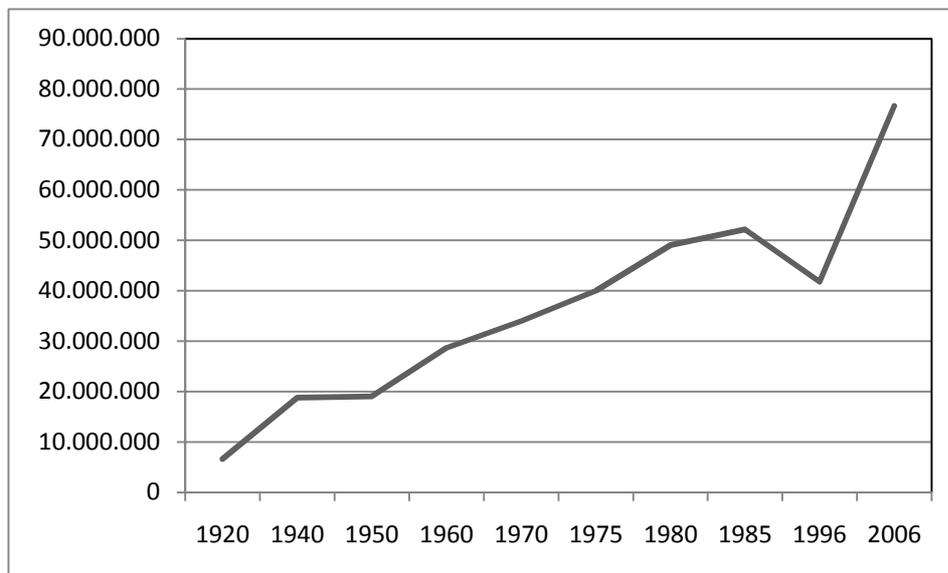


Figura 3: Evolução histórica da área de lavouras no Brasil

Além do aumento da área plantada, foi significativo o ganho de produtividade. A EMBRAPA (2003) aponta que enquanto o crescimento da produção física de grãos entre 1990 e 2003 foi de 100%, a área plantada aumentou apenas 12%. As exportações também experimentam crescimento acentuado. Segundo o mesmo autor, o agronegócio exportou quase 50% mais entre os anos de 2000 e 2003.

Assim como a mineração, a expansão das atividades agrícolas no Brasil exerce forte pressão sobre o meio ambiente. Flores (1992) aponta que em áreas de agricultura intensiva os

impactos ambientais verificados são erosão, compactação, empobrecimento e poluição do solo, alteração nas vazões dos rios, além de assoreamento e poluição química dos cursos d'água. Em áreas de ocupação extensiva, o autor destaca, além dos impactos mencionados, a derrubada da vegetação nativa, a redução da biodiversidade e a destruição de ecossistemas.

No contexto de expansão de atividades agrícolas, cabe destacar o papel da agricultura de arroz irrigado. No Brasil, este cereal representa cerca de 20% do total de grãos colhidos, sendo possível estimar, para 2011, um aumento de 40% na produção em relação ao ano 2000 (SOARES, 2006).

Cabe ressaltar que não se discute possíveis ganhos ou perdas relativos à expansão das atividades de mineração e agricultura. Pretende-se tão somente apresentar o cenário de incremento das respectivas produções e as pressões que este incremento podem vir a exercer sobre os recursos hídricos. Ressalta-se, ainda, que as figuras 2 e 3, embora deixem claro que as respectivas atividades se encontram em processo de crescimento, não apresentam um parâmetro de comparação. Enquanto a figura 2 trata da expansão da produção mineral em anos recentes (o que não significa que esta expansão tenha ocorrido apenas em tempos recentes), a figura 3 apresenta um cenário histórico, que cobre a maior parte do século XX e o início do século XXI, relacionado com a área plantada (que, por sua vez, não reflete o aumento da produção, pois, conforme já comentado, a produtividade tem crescido em velocidade muito maior). No entanto, ambas as figuras têm a capacidade de apresentar a tendência crescente da exploração de tais recursos.

Constatada a importante expansão da mineração e da agricultura e verificada a pressão das duas atividades citadas sobre o meio ambiente no Brasil e, em especial, sobre os recursos hídricos, pode-se dizer que é necessária uma política de conciliação com vistas a impedir o prejuízo recíproco. Garcia (2009) questiona o modelo de desenvolvimento que desconsidera a variável ambiental e afirma que um dos maiores desafios brasileiros em tempos atuais é a conciliação entre o manejo sustentado dos recursos naturais, a proteção e o uso inteligente da biodiversidade em face da expansão da agropecuária e da mineração.

2.1.2 Aspectos Legais

O parágrafo 2º do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira estabelece que “aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei” (BRASIL, 1988). Com isto não é mais permitido no Brasil o abandono das minas esgotadas, ou consideradas economicamente inviáveis, sem a devida recuperação da área. Como a recuperação pode até mesmo ser inviável (como no caso de aquíferos subterrâneos), é mais prático o controle da descarga de efluentes por meio de seu tratamento.

Além disso, a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) determina os padrões de qualidade da água que devem ser atingidos para que se possa fazer determinado uso dos recursos hídricos. Assim sendo, as águas podem se enquadrar em cinco classes distintas, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Classificação das águas doces

Classe	Destinação
Especial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para uso humano com desinfecção; ▪ Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; ▪ Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
I	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado; ▪ Proteção das comunidades aquáticas; ▪ Recreação de contato primário; ▪ Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rente ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; ▪ Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
II	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional; ▪ Proteção das comunidades aquáticas; ▪ Recreação de contato primário; ▪ Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; ▪ Aquicultura e atividade de pesca.
III	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; ▪ Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas ou forrageiras; ▪ Pesca amadora; ▪ Recreação de contato secundário; ▪ Dessedentação de animais.
IV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Navegação; ▪ Harmonia paisagística.

(Fonte: Resolução nº 357 do CONAMA, 2005.)

Em paralelo, o Código de Mineração, em seu artigo de número quatorze estabelece como parte do Plano de Aproveitamento Econômico a análise da viabilidade econômica da exploração mineral.

Por outro lado, a água que escoia pelos sistemas naturais de drenagem não está disponível em sua plenitude para a dissolução das cargas poluentes da mineração. Ela também é utilizada, entre outros usos, para abastecimento humano e para irrigação de cultivos. Assim como a redução da vazão devida à irrigação provoca danos nas atividades de mineração, o lançamento de cargas poluentes também prejudica as atividades agrícolas por tornar a água imprópria à irrigação das culturas.

Em 1997, a Lei 9.433 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos cujos objetivos são o uso racional e sustentável dos recursos hídricos, a garantia de fornecimento de água em quantidade e qualidade adequada aos atuais e futuros usos e a atenuação dos efeitos de eventos hidrológicos críticos. A referida lei classifica os recursos hídricos como bens públicos, de natureza limitada e dotados de valor econômico. Por isso, sua gestão deve visar à preservação dos usos múltiplos e deve ocorrer de forma integrada, descentralizada, participativa e articulada entre os diversos órgãos gestores.

Para cumprir a Constituição Federal, a Resolução 357 do CONAMA, o Código de Mineração e a Lei 9.433 no que diz respeito à utilização de recursos naturais, considera-se necessário proceder da seguinte forma:

- Incluir na análise da exequibilidade econômica da exploração mineral os custos de tratamento dos resíduos lançados nos corpos d'água.
- Estabelecer que a irrigação de cultivos considere outros usos da água, quer para outras atividades, quer para manutenção das funções do ecossistema a jusante.

Acredita-se ser este o procedimento correto, já que, no caso contrário, nem sempre seria possível o atendimento dos limites de concentração e as resoluções do CONAMA cairiam em desuso.

2.2 PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

O presente tópico da Revisão Bibliográfica apresenta as maiores preocupações em termos de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Pretende-se identificar os fatores considerados importantes e mais influentes para alocação eficiente de água.

Para isso, após uma visão geral sobre o tema, é apresentada a abordagem atual e, por fim, os princípios fundamentais do planejamento e da gestão dos Recursos Hídricos.

2.2.1 Visão Geral

Ao longo da história, as interações entre a água e o meio ambiente, assim como as interações entre a água e o desenvolvimento econômico têm tido abordagem simples e objetivos locais. Entretanto, a complexidade dessas interações sofre constante incremento, envolvendo conexões entre economia e meio-ambiente (Kindler, 1998). Clark (1986) comentou a esse respeito que a Humanidade havia entrado em uma era de interdependência de larga escala entre o desenvolvimento econômico e o ambiente natural.

Tal interdependência se intensifica à medida que a população aumenta, provocando uma maior demanda por produtos agrícolas e uma maior produção industrial. Tendo em vista a necessidade de água tanto na produção agrícola quanto na industrial, pode-se dizer que o gerenciamento dos Recursos Hídricos em situações dessa natureza é um grande desafio atual.

2.2.2 Abordagem Atual

O planejamento e a gestão dos recursos hídricos devem considerar objetivos tão diversos quanto: eficiência econômica, preservação ambiental, distribuição adequada dos efeitos das ações (positivas e negativas), desenvolvimento regional com estabilidade, além de todas as considerações relativas ao risco de o sistema apresentar falhas. Segundo Kindler (1998), a dificuldade de implantação dessas ações consiste não só na complexidade inerente à elaboração e ao monitoramento desses modelos, mas também em três aspectos básicos:

- Os objetivos mencionados não possuem a mesma unidade de medida (alguns são, inclusive, incomensuráveis);

- A priorização dos objetivos depende das necessidades da população que são diferentes de acordo com a região;
- O estabelecimento de diversos objetivos (em alguns casos difíceis de conciliar) costuma provocar conflitos entre os interessados.

Policanski (1998) chama atenção para o fato de que, apesar de ser parte essencial da solução, a ciência não deve ser a única forma de tratar o problema. Conforme mencionado, fatores políticos e sociais também devem ser observados. Tal autor apresenta dois estudos do Conselho de Pesquisa Nacional (*National Research Council*, NRC na sigla em inglês, é o setor operacional da Academia Nacional de Ciências dos EUA) que mostram preocupação com vazões de permanência.

O primeiro deles diz respeito à manutenção dos níveis adequados do lago chamado Mono Lake na Califórnia. Segundo o estudo do NRC, o uso consuntivo das águas dos afluentes do referido lago provocam consideráveis perdas biológicas quando acarretam a redução da cota limnimétrica para valores abaixo de 1941,6 m. O mesmo estudo ainda possibilita o conhecimento dos efeitos sobre o lago gerados pelas comportas de uma hidrelétrica localizada em um de seus afluentes.

O segundo estudo do NRC, apresentado por Policanski, refere-se ao declínio da população de salmão na costa noroeste dos EUA. De acordo com o estudo, as causas são: falta de manutenção das flutuações ambientais (entre tais flutuações, ressalta-se a vazão dos rios que deságuam na região), diversidade genética e populacional do ecossistema marítimo, dificuldade de entendimento entre os agentes interessados e até o fracasso das instituições protetoras do salmão.

Richter *et al* (2003) tratam do “gerenciamento ecologicamente sustentável dos recursos hídricos”. Segundo os autores, o gerenciamento para ser considerado como tal deve apresentar as seguintes características:

- Estimativa das vazões requeridas pelo ecossistema;
- Determinação das influências antrópicas;
- Identificação de áreas de potenciais incompatibilidades;

- Incentivo ao diálogo para busca de soluções;
- Realização de simulações para considerações de incertezas;
- Projeto e implementação de um plano adaptativo.

Dentre as características citadas, o autor considera fundamental a estimativa das vazões requeridas pelo ecossistema e a realização de simulações para identificação de incertezas. O estudo relata dois países em que foram obtidos resultados satisfatórios no planejamento de uso da água, após a determinação de uma vazão para manutenção do ecossistema a jusante (também conhecida como vazão ecológica). Nos EUA, não é permitida a violação da vazão ecológica na bacia formada pelos rios Apalachicola-Chattahoochee-Flint, situada na Flórida. Na África do Sul, em todo o seu território, é proibido o uso da água além da vazão ecológica e do valor estabelecido para atendimento das necessidades básicas humanas (26 L por pessoa por dia).

Gleick (1998) também apresenta características para um bom planejamento de uso da água. Conforme o autor, os seguintes critérios devem ser considerados:

- Garantia de água para a saúde humana;
- Garantia de água para manutenção e restauração de ecossistemas;
- Manutenção da qualidade da água em padrões pré-estabelecidos;
- Ações antrópicas não devem impactar a renovação de estoques e vazões em longo prazo;
- Coleta e divulgação de dados sobre disponibilidade, uso e qualidade da água;
- Elaboração de mecanismos institucionais para prevenção e resolução de conflitos;
- Tomada de decisão de maneira democrática, com representatividade e participação de todas as partes envolvidas.

Koch e Grünewald (2008) comentam que a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) deve levar em consideração as funções econômica, social e ecológica do ciclo

hidrológico. Os autores ressaltam, ainda, que a principal tarefa da GIRH é conciliar a captação de água em local, quantidade, qualidade, tempo e probabilidade adequados à demanda existente, utilizando a menor quantidade de recursos financeiros possível.

Opricovic (2008) elabora uma abordagem para resolução de conflitos pelo uso da água baseada em Tomada de Decisão Multicritério (MCDM – *Multi Criteria Decision Making*) para o desenvolvimento de um sistema de reservatórios no Rio Mlava (Bélgica) e seus afluentes para abastecimento urbano. O autor explica que o método teve o objetivo de conciliar aspectos ambientais com aspectos socioeconômicos e culturais. Além disso, conclui que, independente do modelo adotado, a solução deve ser implementada depois de adquirido consenso (ou outra forma de concordância) entre os diversos atores para que haja sustentabilidade do acordo.

Naiman e Turner (2000) classificam como necessidade básica a incorporação de princípios ecológicos no uso das águas e em decisões gerenciais a respeito. A especificação desses princípios ecológicos (tais como: tempo, território, espécies, perturbação e escala) e o entendimento de suas implicações ambientais e sociais são passos essenciais no caminho da sustentabilidade. Os autores estabelecem, ainda, quatro razões fundamentais para o sucesso ou o fracasso do planejamento de recursos hídricos:

- Fragilidade do modelo;
- Custo e risco de modelos adaptativos;
- Proteção de interesses individuais;
- Conflitos relacionados com valores institucionais divergentes.

Colwell (1998) ressalta, entretanto, que apesar das dificuldades, o entendimento e o correto gerenciamento da complexidade biológica dos ecossistemas persistem como um dos maiores objetivos da sociedade moderna. Huber (1989) salienta que a maior parte dos programas se baseou na saúde humana em detrimento de uma abordagem mais ampla da dinâmica dos recursos naturais envolvidos. Por isso, muitos problemas hídricos persistem.

Karr (1991) aponta que, apesar de ser a falta da capacidade da água de sustentar a vida o primeiro sinal de degradação ambiental, a sociedade enfatiza abordagens de

recuperação que são predominantemente “não biológicas”. O autor acrescenta que a pesquisa ecológica expandiu o conhecimento acerca da dinâmica dos sistemas de recursos hídricos, mas tal conhecimento ainda não foi usado de maneira eficaz na sua proteção, apenas em considerações toxicológicas de natureza pontual.

Postel (2000) propõe um esforço global no sentido de assegurar que os ecossistemas aquáticos recebam vazão em quantidade, qualidade e no tempo adequado para o desempenho de suas funções. Segundo a autora, a associação entre os desafios que a escassez de água impõe à produção de alimentos, ao ecossistema e à estabilidade politicossocial requer novas abordagens de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Postel (2000) considera fundamental que haja quantidade e qualidade de água suficiente para a manutenção das funções ecológicas e, onde necessário, de retornar água para o sistema natural a fim de restabelecer tais funções.

A questão dos conflitos entre os diferentes grupos de interesse é tópico importante referente ao assunto e recebe especial atenção dos pesquisadores. Christensen *et al* (1986) sugerem que a ciência, auxiliada pela política, seja o modelo para o gerenciamento dos ecossistemas, argumentando que as diretrizes devem ser entendidas como hipóteses alternativas para o alcance de objetivos operacionais. Risser (1996) convoca os ecologistas ao intenso estudo de processos de tomada de decisão nos sistemas institucionais e governamentais e, assim, colaborar com os tomadores de decisão. Polls (1994) sugere um diálogo construtivo com todas as partes afetadas ainda nos estágios iniciais do planejamento para evitar erros e ações judiciais no futuro. Firth (1998) acrescenta ao processo de planejamento e gestão dos recursos hídricos a necessidade de “vontade política” e de liderança a fim de integrar pesquisa com educação e a correta tomada de decisão.

2.2.3 Princípios Fundamentais

A revisão da literatura indica diversos elementos essenciais para a formulação de uma boa política de planejamento e gestão de recursos hídricos. No entanto, alguns desses elementos chamam a atenção por serem temas recorrentes, ou seja, por se tratar de recomendação de vários autores.

Dessa forma, acredita-se que um modelo eficaz e eficiente de planejar e gerir os recursos hídricos deve considerar os seguintes princípios: conexão entre economia e meio

ambiente; incorporação de fatores políticos e sociais e de influências antrópicas; avaliação das incertezas inerentes aos recursos hídricos; avaliação de vazões requeridas pelo ecossistema; mecanismos de prevenção e resolução de conflitos nas tomadas de decisão. A Tabela 2 relaciona os autores pesquisados com cada um desses princípios.

Tabela 2: Princípios de planejamento e gestão de recursos hídricos

Princípios	Autores
Conexão entre economia e meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kindler (1998); ▪ Clark (1986); ▪ Koch; Grünewald (2008); ▪ Opricovic (2008).
Incorporação de fatores políticos e sociais e das influências antrópicas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Policanski (1998); ▪ Richter (2003); ▪ Gleick (1998).
Consideração de incertezas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Richter (2003); ▪ Naiman; Turner (2000).
Vazões requeridas pelo ecossistema	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Policanski (1999); ▪ Richter (2003); ▪ Gleick (1998); ▪ Naiman; Turner (2000); ▪ Colwell (1998); ▪ Huber (1989); ▪ Karr (1991); ▪ Postel (2000).
Prevenção e resolução de conflitos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleick (1998); ▪ Opricovic (2008); ▪ Naiman; Turner (2000); ▪ Christensen <i>et al</i> (1986); ▪ Risser (1996); ▪ Polls (1994); ▪ Firth (1998).

2.3 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO DE USO DOS RECURSOS NATURAIS

A bacia hidrográfica pode ser vista como um sistema formado por uma ou várias fontes de água, por demandas afluentes e derivações e por componentes intermediários (tratamento e reciclagem). A bacia é caracterizada não só por processos naturais de ordem física, química e biológica, mas também por intervenções humanas e políticas de gerenciamento. A relação entre e intracomponentes deve ser considerada em único modelo.

Cai *et al* (2006) argumentam que a escolha da bacia hidrográfica como unidade de estudo deve-se aos seguintes fatores: (1) é a unidade apropriada para o gerenciamento físico e técnico dos recursos hídricos; (2) a competição entre usos a montante e a jusante é crescente e deve ser regulada ao longo de toda a bacia; (3) também é crescente a importância das influências ambientais de intervenções antrópicas e, por isso, tais intervenções (regularização de vazões e captações, por exemplo) devem ser gerenciadas em escala de bacia; (4) é a unidade adequada para monitoramento das complexas relações e implicações dos mecanismos de alocação de água e das políticas para eficiência econômica; e (5) é a melhor unidade para verificação dos efeitos em terceiros (externalidades).

As exigências relativas à gestão por bacia devem-se, principalmente, ao engajamento necessário de todos os atores e à transferência de certos poderes à comunidade local (LAJOIE, 1999). Tal tipo de gestão demanda a participação de todos os usuários e da população em geral, requer sustentação não só do poder público, mas de indústrias e produtores agropecuários.

De acordo com Lajoie (1999), a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e estudo traz benefícios nos campos ambiental, social e econômico.

No campo ambiental a autora menciona os seguintes benefícios:

- Proteção e restauração do meio ambiente;
- Melhor avaliação das prioridades de ação.

No campo social, a autora destaca:

- Melhor conhecimento das interações e efeitos acumulativos das atividades humanas sobre o meio ambiente;
- Incremento da qualidade de vida;
- Incremento da proteção à saúde humana;
- Melhor definição de responsabilidades;
- Construção de consenso, regulação de conflitos, comunicação e participação dos atores;
- Estímulo do sentimento de comunidade e democratização do processo de gestão dos recursos hídricos.

No plano econômico:

- Manutenção e desenvolvimento do crescimento econômico;
- Utilização mais eficaz do território;
- Melhor utilização de fundos públicos e privados;

- Possibilidade de repartição justa dos custos inerentes à utilização dos recursos hídricos;
- Ganho de eficiência, devido à coordenação dos programas de ação.

As abordagens de planejamento e gerenciamento que utilizam a bacia hidrográfica como unidade de trabalho têm evoluído bastante, pois as características biogeofísicas dessas bacias apresentam sistemas ecológicos e hidrológicos relativamente coesos. No início, o processo de gerenciamento e planejamento de bacias hidrográficas visava basicamente à solução de problemas relacionados à água, com prioridade para o controle de inundações, para a irrigação, a navegação ou para o abastecimento público e industrial. Atualmente, o planejamento e o gerenciamento de bacias hidrográficas devem incorporar todos os recursos ambientais da área de drenagem e não apenas o hídrico. Além disso, a abordagem adotada deve integrar os aspectos ambientais, sociais, econômicos e políticos, com ênfase no primeiro, pois a capacidade ambiental de dar suporte ao desenvolvimento possui sempre um limite, a partir do qual todos os outros aspectos serão afetados (PIRES; SANTOS, 1995).

Cargas de poluentes das mais diversas fontes (agropecuária, urbana e industrial) são lançadas de forma pontual (localização da emissão conhecida) e/ou difusa (dispersa ao longo de uma área) nos sistemas ambientais, tais como redes de drenagem e lagos, ou dispostas sobre o solo. As águas e os sedimentos constituem-se no principal mecanismo de transporte destas cargas. Neste processo de transporte, reações químicas, físicas e biológicas (tais como biodegradação, hidrólise, turbulência) resultam em alteração de concentrações dos parâmetros de qualidade de água associados a estas cargas. O ponto de monitoramento de qualidade de água reflete uma agregação de todas as cargas de montante da bacia (MENDES, 2006a). Em síntese, o problema apresentado pode ser dividido nas seguintes componentes:

- Cargas de resíduos no meio ambiente.
- Transformações químicas e biológicas e movimentação de águas (e sedimentos).
- Concentração resultante de uma determinada substância (como OD ou Nutrientes) em uma posição específica (diferente do ponto de lançamento do resíduo) durante um tempo do dia (ou do ano).

A figura 4, adaptada de Mendes (2006a), ilustra o processo.



Figura 4: Diferentes cargas de poluentes na bacia.

Conforme mencionado, o problema da gestão da qualidade de água em bacias concentra-se no controle das cargas e da captação de água. Salienta-se, entretanto, que tais operações não devem se resumir simplesmente à análise de engenharia dos efeitos das cargas na qualidade de água e da quantidade de água captada. Esta análise também deve incluir restrições de natureza econômica na implantação destes controles, que por sua vez se inserem em um contexto sócio-político. Assim, o modelo de gerenciamento deve possibilitar:

- A representação de bacias hidrográficas com diversidade de usos, permitindo a variabilidade espacial das propriedades físicas da bacia;
- A união das fontes e dos impactos da poluição através da análise do processo de transporte e agregação das cargas de poluentes ao longo das linhas de escoamento;
- A implantação de um instrumento de mercado para reduzir o lançamento de cargas;

- O emprego de dados de monitoramento de qualidade de água para comparação dos resultados observados e calculados, permitindo otimização de parâmetros dos modelos;
- A verificação da maximização do bem-estar social;
- A aplicação em diferentes bacias hidrográficas.

2.4 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO E DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CARVÃO MINERAL

A mineração no mundo começou entre 6000 e 7000 anos atrás, mas apenas após a I Revolução Industrial (séc. XVIII), tornou-se mais intensa. Esse longo processo de extração mineral foi responsável pelo enriquecimento de muitas nações e, em alguns casos, sua única fonte de rendas. No entanto, além da geração de divisas, a mineração deixou um grande rastro de áreas impactadas (GOUDIE *apud* BATTY, 2005).

A fim de compreender o processo relativo à extração de carvão mineral, são apresentadas as tecnologias de produção, a formação dos impactos da mineração nos corpos hídricos, a drenagem ácida de mina e as tecnologias existentes para manejo de resíduos.

2.4.1 Tecnologia de Produção

A escolha do método de mineração, entre outros fatores, é determinada pela geologia apresentada no local de extração. Assim, a combinação da profundidade da camada de carvão e da litologia vai estabelecer se o método de lavra será subterrâneo ou a céu aberto.

Aproximadamente 60% da produção total de carvão mineral mundial é realizada por lavra subterrânea (WCI, 2010). No entanto, em alguns países, tais como Austrália e EUA, a lavra a céu aberto predomina. Nos EUA, 67% da produção é oriunda da lavra a céu aberto e na Austrália, esse índice chega a 80%. O Brasil se aproxima da média mundial com, aproximadamente, 59% da produção de carvão sendo proveniente da lavra subterrânea e 41% da lavra a céu aberto. Descrevem-se, a seguir, os métodos de lavra de carvão mineral.

Lavra subterrânea

A lavra subterrânea ocorre, em geral, quando a camada de carvão mineral está localizada em grandes profundidades ou quando a camada de solo e rochas que a cobre (*overburden*) apresenta dificuldades de remoção. Dois métodos de lavra predominam em subsolo: o método *room-and-pillar* e o método *longwall mining*.

O método *room-and-pillar* tem seu nome oriundo do inglês e tem como equivalente o termo em português “câmaras e pilares”. Ele consiste na construção, no interior da camada carbonífera, de uma rede de espaços vazios (câmaras) sustentada por pedaços remanescentes da mesma camada (pilares).

O método *longwall mining* consiste na extração total da camada de carvão encontrada no subsolo. Essa técnica necessita de cuidadoso planejamento, pois deve ser assegurado que a geologia local não configure riscos à atividade. A retirada do minério ocorre em extensões entre 100 e 350 metros, sendo a rocha de cobertura sustentada, durante a lavra, por macacos hidráulicos.

Da comparação entre as duas técnicas de lavra subterrânea conclui-se que a técnica de câmaras e pilares permite que a retirada do carvão se inicie de forma mais rápida, já que exige um maquinário mais barato. A exploração por *longwall mining* exige máquinas de grande porte cujo custo operacional pode atingir valores elevados (WCI, 2010).

A escolha da melhor técnica deve ser baseada no tipo de terreno encontrado, mas, em alguns casos, uma mesma mina pode apresentar os dois tipos de lavra subterrânea.

Destaca-se que na lavra subterrânea é comum o encontro com aquíferos, o que exige o constante esgotamento da mina (GIBSON, 1987). Assim, a água bombeada do interior da mina deve passar por algum sistema de tratamento, antes de ser despejada nos corpos d’água.

Lavra a céu aberto

Esse método de lavra apresenta viabilidade econômica quando a camada de carvão se localiza próxima à superfície (WCI, 2010). Consiste na escavação e remoção da camada de solo que cobre o carvão. Com o carvão exposto, a lavra se inicia.

A retirada da cobertura sobre o depósito (*overburden*) é realizada por meio de explosivos e/ou de forma mecanizada. Uma vez exposta, a camada de carvão é, então, removida. O material extraído pode ser levado por caminhões para beneficiamento ou pode ser levado para o consumo direto.

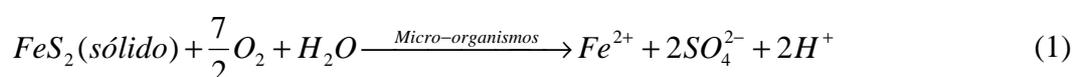
Esse método é responsável por uma alta produtividade da mina, tendo em vista que, com ele, todo o carvão é retirado da camada. Em geral, por questões de segurança, é comum que a lavra subterrânea seja finalizada ainda que exista minério no subsolo.

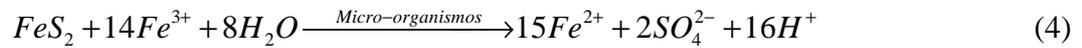
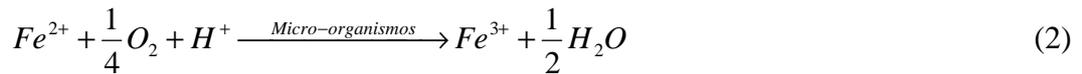
Em relação à contaminação dos corpos d'água, especial atenção deve ser dada à entrada de águas pluviais nas escavações. A retirada do *overburden* e os próprios trabalhos superficiais, tais como o beneficiamento e a construção de vias de acesso, são responsáveis pela alteração da drenagem natural do terreno e do regime de infiltração de água no subsolo. Assim, pode haver tanto a contaminação de águas subterrâneas como a de águas superficiais.

A contaminação de águas subterrâneas pode ocorrer pelo contato de águas do lençol freático com a camada de minério encontrada, gerando DAM. Além disso, a entrada de águas pluviais na cava pode também formar DAM e contaminar lençóis mais profundos. Já a contaminação das águas superficiais pode ocorrer com o bombeamento de água do interior da escavação e seu despejo sem tratamento nos cursos d'água. Assim, é importante que, além do tratamento adequado, seja construída uma rede de drenagem na região de exploração com o objetivo de impedir o contato de águas pluviais com o minério (GIBSON, 1987).

2.4.2 Drenagem Ácida de Mina (DAM)

A DAM é resultado de um conhecido processo químico. Em contato com ar, água e micro-organismos, minerais ricos em enxofre, como a pirita (FeS_2), se oxidam e produzem ácido sulfúrico. Concomitantemente, ferro e outros metais são descarregados na água. O problema pode ser associado com a extração de carvão ou com a escavação de rochas nas quais minerais sulfurosos, antes no subsolo, entram em contato com o oxigênio e com a água. Gusek (2005) apresenta as quatro reações do processo de formação de DAM:





Em uma solução com pH abaixo de quatro e meio, as reações (1), (2) e (4) são catalisadas por organismos unicelulares que aceleram a oxidação da pirita fazendo com que a acidez aumente. O aumento da acidez, por seu turno, provoca a elevação da concentração de outros metais pesados, sulfatos e do total de sólidos dissolvidos (STUMM *et al.* apud SEYLER *et al.*, 2005). Em outras palavras, os íons de hidrogênio e de ferro catalisam a oxidação de outros metais sulfurosos que, porventura, estejam presentes. Dessa forma, pode haver a contaminação da água por cobre, zinco, chumbo e manganês, entre outros metais.

Hallberg e Johnson (2005) definem dois tipos de organismos predominantes na geração da DAM, de acordo com o índice de acidez (pH) atingido por esse contaminante. O primeiro tipo diz respeito a elementos dos reinos *Bacteria* e *Archaea* que vivem em soluções aquosas com baixo pH (até próximo ao limite superior de 3,0) e, por isso, recebem a classificação de organismos acidófilos. Esses organismos são os mais importantes, pois atuam de maneira decisiva na formação de DAM. O primeiro representante dessa categoria a ser isolado em laboratório é conhecido como *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Esse micróbio tem a capacidade de oxidar íons de ferro e de enxofre e substâncias sulfurosas em geral. Contudo, o mais importante organismo dessa categoria, por ser mais numeroso em soluções ferrosas, chama-se *Leptospirillum ferrooxidans*.

A pirita é uma substância estável quando não há oxigênio ou água disponível. Porém, a presença dessas substâncias provoca espontânea oxidação. A diferença entre o fenômeno espontâneo e aquele em presença de micro-organismos é a velocidade da reação. Dissolvendo a pirita através da regeneração do Fe^{2+} para Fe^{3+} (equação 2), os organismos aumentam a velocidade da reação em muitas ordens de grandeza (HALLBERG; JOHNSON, 2005).

Em soluções com pH acima de quatro, o oxigênio molecular reage espontaneamente com os cátions de ferro, mas para valores de acidez inferiores essa reação abiótica é insignificante (STUMM *et al.* apud SEYLER *et al.*, 2005). Outros micro-organismos

acidófilos podem oxidar o íon sulfato da equação (1), outros compostos inorgânicos sulfurosos ou o próprio enxofre e gerar ácido sulfúrico (equação 4).

O segundo tipo de organismos presentes na DAM são as bactérias neutrófilas ou acidófilas moderadas, assim chamadas por viverem em soluções com pH entre os valores de três e seis. Essas bactérias são responsáveis pela oxidação do íon ferroso (Fe^{2+}) para íon férrico (Fe^{3+}), provocando o aumento da acidez (HALLBERG; JOHNSON, 2005).

Quando não há pirita no meio, a oxidação dos metais sulfurosos se dá de maneira química (em vez da reação assistida pelos micro-organismos), tornando-a muito lenta (GUSEK; CLARKE-WHISTLER, 2005).

Portanto, os componentes da DAM dependem da natureza do terreno explorado. Em geral encontram-se na DAM as seguintes substâncias: ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre, níquel, cádmio e íons sulfatos. Há ainda relatos de presença na DAM de íons fosfatos e arsênio (BEDNAR *et al.*, 2004).

2.4.3 Formação dos Impactos da Mineração em Corpos Hídricos

A natureza dos problemas ambientais existentes em áreas impactadas pela mineração varia de acordo com o material extraído, com as técnicas de processamento utilizadas, com a geografia e com a geologia do local e, por fim, com o tempo de exploração relacionado (BATTY, 2005). Pode-se dizer que a mineração afeta, de maneira negativa, a biota local, provocando alterações na estrutura das comunidades naturais e reduzindo a biodiversidade.

Younger (2004) classifica os impactos nos corpo d'água de acordo com o processo de geração da DAM. Assim, os impactos relacionam-se com a mineração *per se*, ou atividades de extração, com o processamento do minério e disposição dos rejeitos, com o bombeamento d'água para o exterior da mina e com as inundações pós-mineração.

Os impactos oriundos das atividades de extração devem-se ao fato de que as escavações e operações relacionadas a ela podem provocar a alteração da drenagem natural do terreno, desviando os caminhos preferenciais da água. Embora a mineração subterrânea provoque contaminação maior das águas do subsolo, pelo contato desta com o minério, águas superficiais que estejam na continuidade hidráulica do sistema afetado acabam, também,

impactadas. Ainda assim, a mineração *per se* provoca, em geral, efeitos localizados e menos visíveis que as outras formas de contaminação.

Em relação ao beneficiamento do minério, pode-se dizer que os rejeitos, em geral, são confinados e retidos em bacias de contenção para posterior descarga. A percolação de material lixiviado das pilhas formadas pelos rejeitos e das bacias de contenção pode causar a contaminação de águas superficiais e subterrâneas por DAM.

Entre os impactos causados pelo bombeamento citam-se a subsidência, a redução da vazão dos cursos d'água adjacentes que estejam em continuidade hidráulica ao lençol bombeado e a poluição de águas superficiais e subterrâneas caso a água bombeada já esteja contaminada por DAM ou tenha baixa qualidade.

Por fim, de acordo a classificação de Younger (2004), a inundação das minas, geralmente, leva a impactos duradouros. Além da contaminação química, provocada pela formação da DAM, há o risco de subsidência, tendo em vista que a água pode ser responsável pela erosão dos pilares de sustentação da mina.

2.4.4 Tecnologia de Manejo de Resíduos

Para que haja a geração de drenagem ácida, basta a existência de quatro elementos: pirita, água, oxigênio e micro-organismos. Isto faz com que seja possível a formação de DAM, ainda que a exploração da mina tenha cessado. Assim, a tecnologia de manejo de resíduos deve ser considerada ao longo de todo o tempo de duração do empreendimento mineiro, incluindo-se a fase pósfechamento da mina.

As formas de tratamento de resíduos de operações mineiras são classificadas em ações para o tratamento de efluentes e ações para o fechamento do empreendimento. As ações para o tratamento do efluente gerado pelas escavações, pela lavagem do minério ou pela lixiviação dos depósitos de resíduos são, por sua vez, classificadas como tratamento passivo e tratamento ativo. Desde que haja manutenção das instalações envolvidas no tratamento, estas ações podem se estender até o período pósfechamento.

As ações para o fechamento do empreendimento consistem na recuperação da área explorada e dizem respeito às formas de cobertura que a área receberá. Como após o

encerramento das atividades pode continuar a haver a formação de DAM, cada tipo de cobertura é responsável por um grau de redução do poder de contaminação do efluente. A seguir, são apresentadas as formas de tratamento durante a operação da mina.

Tratamento Passivo

O tratamento passivo é definido como “a melhoria da qualidade da água com a utilização de fontes de energia naturalmente disponíveis, em sistemas de tratamento com escoamento por gravidade, projetados para que necessitem de pouco frequente, porém regular, manutenção a fim de operarem, de forma bem-sucedida, por toda sua vida útil” (PIRAMID CONSORTIUM, 2003). As principais estruturas para a realização desse tipo de tratamento são as lagoas anaeróbica e aeróbica, o canal calcário óxico, o dreno calcário anóxico, a bacia de fluxo vertical e o leito de remoção de manganês (OSM, 2006).

As lagoas aeróbicas e anaeróbicas são utilizadas para a retirada de metais da DAM e para redução da acidez (sendo a última mais eficiente neste aspecto). Elas consistem na escavação de uma bacia em forma trapezoidal, onde é depositado o efluente para tratamento. Há, ainda, uma cobertura, sobre a qual será plantada a vegetação apropriada. Deve-se evitar o influxo de material lixiviado. A lagoa anaeróbica possui ainda uma camada de calcário.

O canal óxico e o dreno anóxico são estruturas simples que consistem na escavação de um canal, com fundo de calcário, para a condução de DAM. O dreno anóxico diferencia-se do canal óxico por ser envolto por uma membrana sintética e coberto com solo.

A bacia de fluxo vertical também é uma escavação de forma trapezoidal onde se encontram uma camada de argila, uma camada de calcário e uma de matéria orgânica, esta com o objetivo de retirar oxigênio do efluente. Difere das lagoas pelo fato de possuir em seu fundo uma rede de tubulações destinada à entrada do efluente na bacia.

O leito de remoção de manganês também consiste em uma escavação trapezoidal. Possui uma espessa camada calcária destinada à remoção desse metal.

Auxiliar no processo de tratamento, a bacia de contenção tem forma trapezoidal e destina-se à precipitação dos metais. Encontra-se, em geral, em linha com outros dispositivos.

A tabela 3, adaptada de Rees (2005), relaciona as estruturas com os contaminantes por elas removidos.

Tabela 3: Contaminante objeto do tratamento

TECNOLOGIA DE TRATAMENTO PASSIVO	ELEMENTO-ALVO DO TRATAMENTO
Lagoa Anaeróbica	SO ₄ , acidez
Lagoa Aeróbica	Fe, U, Mg, As, CN
Canal calcário óxico	Acidez, Zn, Cd, As, Mg, Ca
Dreno calcário anóxico	Acidez, Zn, Cd, As, Mg, Ca
Bacia de fluxo vertical	Acidez, SO ₄
Leito de remoção de manganês	Mn

Tratamento Ativo

O tratamento ativo de drenagem ácida de mina consiste na adição de um reagente químico que seja capaz de provocar a precipitação de substâncias contaminantes a fim de que estas sejam posteriormente removidas. É mais utilizado em soluções temporárias, em águas com elevado grau de contaminação ou quando há pouca disponibilidade de espaço (COULTON; WILLIAMS, 2005). Para os demais casos, o tratamento passivo é mais indicado pela sua pouca necessidade de manutenção e seu baixo custo de operação.

Os principais reagentes utilizados no tratamento ativo são: soda cáustica (NaOH), cal hidratada (Ca(OH)₂), cal virgem (CaO) e amônia (NH₃). Também podem ser utilizados o óxido de magnésio (MgO), o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) e o carbonato de sódio (Na₂CO₃).

Gusek (2005) aponta que os dados de qualidade da água a ser tratada e a medição da vazão de descarga são de extrema importância para o sucesso do tratamento, pois determinam a quantidade de reagente que será lançada para a precipitação dos metais. Além disso, o autor

cita, ainda, as necessidades de remoção e de disposição final do lodo gerado por tal precipitação. A associação de tratamentos (ativo e passivo) pode ser considerada em caso de disponibilidade de espaço e elevado padrão de exigência para despejo de efluentes.

2.5 SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ E DEMANDA HÍDRICA

Os sistemas de cultivo empregados para o arroz irrigado diferenciam-se, basicamente, quanto à forma de preparo do solo, aos métodos de semeadura e ao manejo inicial da água (SOSBAI, 2007). São eles: convencional, pré-germinado, cultivo mínimo, mix, plantio direto e transplante de mudas.

Costuma-se, entretanto, dividir os sistemas de cultivo em dois grandes grupos. Em um deles estão os sistemas nos quais o arroz se estabelece em área inundada e no outro estão aqueles em que a planta se estabelece em solo seco. No primeiro grupo encontram-se os sistemas pré-germinado, mix e transplante de mudas. No segundo grupo estão os sistemas convencional, cultivo mínimo e plantio direto.

A seguir, descrevem-se os sistemas enunciados.

2.5.1 Sistema Convencional

O preparo do solo, no sistema convencional, envolve na primeira etapa operações mais profundas, normalmente realizadas com arado, com objetivo de romper camadas compactadas e eliminar a cobertura vegetal. Na segunda etapa, as operações são superficiais, com objetivo de nivelar, destorroar, destruir crostas superficiais, incorporar agroquímicos e eliminar plantas daninhas no início do seu desenvolvimento, criando assim um ambiente favorável à germinação, emergência e desenvolvimento da cultura (SOSBAI, 2007).

Convém ressaltar que todas essas atividades concorrem para a deformação da estrutura do solo. No sistema convencional a semeadura é realizada a lanço ou em linha.

Zaffaroni e Tavares (1999) reforçam a necessidade de preparação do solo na condição de umidade natural, evitando que esteja muito úmido ou muito seco. A medida tem como objetivo facilitar e reduzir os custos com a mecanização da cultura. Helfer (2006) explica que o sistema convencional é caracterizado pela intensa mecanização e revolvimento

do solo para que as plantas daninhas sejam eliminadas e para criar um ambiente favorável à germinação, à emergência e ao desenvolvimento da cultura implantada.

Segundo Zaffaroni e Tavares (1999), a irrigação é iniciada, geralmente, entre 25 e 40 dias após o cultivo.

2.5.2 Sistema de Cultivo Mínimo

A principal característica desse sistema de cultivo é o revolvimento mínimo do solo, cujo preparo visa apenas corrigir o microrrelevo com uma antecedência de 45 a 60 dias à sementeira. Este período entre o preparo do solo e a sementeira, conhecido como pousio, possibilita a germinação das plantas daninhas antes da sementeira do arroz, facilitando seu controle, através de herbicidas de ação total (ZAFFARONI;TAVARES,1999).

Os trabalhos de preparo do solo tanto podem ser realizados no tanto no verão como no final do inverno ou início da primavera. É conveniente que se faça também o entaipamento, com taipas de base larga e de perfil baixo, a fim de facilitar o acesso por máquinas e tratores sem maiores danos à sua estrutura. Dessa forma, a sementeira do arroz pode ser realizada sobre a taipa previamente construída, uma vez que existem máquinas com dispositivos que permitem tal procedimento (SOSBAI, 2007).

A sementeira é realizada diretamente sobre a cobertura vegetal previamente dessecada com herbicida, sem o revolvimento do solo. Desta forma, a incidência de plantas daninhas, principalmente arroz vermelho, é bastante reduzida.

De acordo com Helfer (2006), o sistema de cultivo mínimo envolve a rotação de culturas cujo processo de sementeira pode ocorrer sob a resteva de uma cultura anterior (pastagem ou flora de sucessão) dessecada quimicamente.

2.5.3 Sistema de Plantio Direto

Pode-se definir o plantio direto como o sistema de sementeira, no qual a semente é colocada diretamente no solo não revolvido. Segundo a SOSBAI (2007), deve-se abrir um pequeno sulco (ou cova) de profundidade e largura que garantam boa cobertura e contato da semente com o solo. Zaffaroni e Tavares (1999) comentam que a sementeira também pode ser

feita diretamente sobre resíduos da cultura anterior ou sobre cobertura quimicamente dessecada. Apenas entre 25 a 30% da superfície do solo é revolvida. O controle de plantas daninhas antes e depois do plantio direto é feito geralmente com herbicidas.

O plantio direto fundamenta-se em três princípios básicos: mínima movimentação do solo, permanente cobertura do solo e rotação de culturas. Tais princípios possibilitam maior conservação do solo. Entretanto, o plantio direto de arroz irrigado na várzea está mais relacionado ao controle do arroz vermelho e à redução dos custos de produção, do que à conservação do solo (SOSBAI, 2007).

A exemplo do sistema de cultivo mínimo, também se deve realizar o entaipamento, com taipas de base larga e perfil baixo para adequação da área para o plantio direto.

Helfer (2006) comenta que os sistemas de plantio direto e de cultivo mínimo diferenciam-se apenas na época e na intensidade de preparo do solo.

2.5.4 Sistema Pré-germinado

As principais diferenças do sistema pré-germinado em relação aos demais métodos são o preparo do solo e o uso de sementes pré-germinadas. O preparo pode ser iniciado com o solo em condições naturais de umidade. Mas, após o nivelamento e alisamento da área de plantio, tornando a mesma adequada para o recebimento da semente pré-germinada, faz-se a semeadura com o solo inundado (ZAFFARONI;TAVARES,1999).

A primeira fase envolve: aração em solo úmido, com destorroamento sob inundação; aração com destorroamento em solo seco e formação de lama após a inundação; e repetição da operação, de modo a eliminar restos de plantas daninhas da lama formada. A segunda fase compreende o nivelamento e o alisamento do terreno a fim de tornar a superfície própria para receber a semente pré-germinada (SOSBAI, 2007).

As operações descritas foram desenvolvidas, principalmente, para pequenas áreas, características das propriedades do Estado de Santa Catarina.

Helfer (2006) salienta que o sistema pré-germinado provoca maiores custos ao produtor, tendo em vista a necessidade de adequação da topografia (para formação de quadros e tabuleiros). A autora aponta ainda outra desvantagem do sistema: o impacto ambiental

caracterizado pelo aumento da turbidez das águas provocado pela intensa movimentação e formação de lama no preparo inicial do solo.

2.5.5 Sistema Mix

Segundo a SOSBAI (2007), o sistema mix é uma variante do sistema pré-germinado. A germinação das sementes de plantas daninhas é estimulada por operações mecânicas de preparo antecipado do solo. Entre 15 e 20 dias antes da semeadura, deve ser feita a dessecação da cobertura vegetal e a inundação do solo. O desenvolvimento da cobertura vegetal deve ser o mínimo possível, já que o excesso não permite que sementes pré-germinadas atinjam o solo. Além disso, a decomposição de matéria orgânica na água gera a produção de ácidos orgânicos, que prejudicam o desenvolvimento das sementes.

Helfer (2006) comenta que, apesar dos maiores custos provocados pelos sistemas pré-germinados e mix, há um nítido crescimento de tais sistemas de produção no Sul do Brasil dada a menor dependência das condições climáticas para preparo do solo e o controle mais eficientes de plantas daninhas, em especial do arroz vermelho.

2.5.6 Sistema de Transplante de Mudanças

O transplante de mudas é o sistema de cultivo mais comum no sul e sudeste da Ásia (KNOBLAUCH, 1997), mas no sul do Brasil está restrito a campos de produção de sementes de alta qualidade (SOSBAI, 2007). O sistema compreende as fases de produção de mudas e do transplante propriamente dito.

2.5.7 Demanda Hídrica do Arroz

A literatura aponta que a demanda hídrica de uma lavoura de arroz possui cinco componentes no caso de sistemas de cultivo com semeadura em solo seco (convencional, plantio direto e cultivo mínimo): saturação do solo, formação da lâmina após emergência, evapotranspiração, perdas por percolação lateral e perdas por percolação profunda. Nos sistemas com semeadura em solo inundado, não há a fase de formação da lâmina após emergência. Em seu lugar, há a formação da lâmina para preparo do solo e para lavoura. Os

sistemas mix e pré-germinado apresentam, portanto, seis componentes para a demanda hídrica.

Para o grupo de sistemas de cultivo com semeadura em solo seco, a SOSBAI (2007) recomenda a utilização de aproximadamente 1,5 L/s*ha durante um período médio de irrigação de 80 a 100 dias.

No sistema de plantio com sementes pré-germinadas, há um período de irrigação maior com início no preparo do solo. Em compensação, durante o ciclo da cultura utiliza-se um menor volume de água. Pode-se afirmar, portanto, que a escolha do sistema de cultivo não implica grandes variações no consumo de água, conforme estudos diversos (MACHADO *et al*, 2006; MARCOLIN; MACEDO, 2001; WEBER, 2000; MARCHEZAN *et al*, 2005).

Dessa forma, o estudo de Cauduro (1996) é importante referência para a quantificação do consumo de água em lavouras de arroz. A tabela 4, baseada no referido estudo, relaciona o componente da demanda com o volume de água utilizada e a parcela que o componente representa do total.

Tabela 4: Demanda hídrica do arroz

PARCELAS DO CONSUMO	CONSUMO (m ³ /ha)	CONSUMO (%)
Saturação do solo	900	8,0
Formação da lâmina	1000	8,5
Evapotranspiração	5550	48
Infiltração lateral	4020	35
Percolação	43	0,5
Total	11513	100

A eficiência da irrigação da cultura de arroz está, portanto, relacionada com a redução das perdas.

O consumo de água também pode variar em função do seu manejo. Os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina apresentam exemplos de diferentes manejos de água. Enquanto no Rio Grande do Sul predominam grandes áreas de cultivo com taipas em nível e manutenção de uma lâmina de água entre 5 e 10 cm; em Santa Catarina prevalecem pequenas áreas de cultivo de quadros em nível. Em consequência, as lavouras catarinenses têm se

mostrado mais eficazes no manejo da água por causa da melhor distribuição da água e do melhor planejamento da irrigação e drenagem (SOSBAI, 2007).

O consumo de água também pode variar no tempo, dependendo do tipo de ciclo da cultura. Os ciclos de cultura do arroz podem ser precoce, médio ou tardio em função do período de início da semeadura. Apesar de o total consumido variar pouco em função do ciclo, a quantidade de água captada pode influenciar bastante no planejamento e na gestão das águas da bacia. A tabela 5, adaptada de SOSBAI (2007), apresenta os períodos favoráveis de semeadura do arroz irrigado em Santa Catarina, onde se realiza o estudo de caso.

Tabela 5: Períodos favoráveis para semeadura do arroz irrigado em Santa Catarina

SUB-REGIÃO	PERÍODOS FAVORÁVEIS DE SEMEADURA DO ARROZ IRRIGADO EM FUNÇÃO DO CICLO		
	PRECOCE	MÉDIO	TARDIO
Baixo Vale do Itajaí e Litoral Norte	21 de agosto a 10 de janeiro	11 de agosto a 20 de dezembro	11 de agosto a 10 de dezembro
Litoral Centro	11 de setembro a 31 de dezembro	01 de setembro a 10 de dezembro	21 de agosto a 30 de novembro
Litoral Sul e Região Sul	21 de setembro a 20 de dezembro	11 de setembro a 10 de dezembro	01 de setembro a 20 de novembro
Médio Vale do Itajaí	21 de setembro a 10 de dezembro	21 de setembro a 30 de novembro	21 de setembro a 20 de novembro
Alto Vale do Itajaí	11 de outubro a 10 de dezembro	11 de outubro a 30 de novembro	21 de setembro a 20 de novembro
Demais regiões	Cultivo não recomendado		

A bacia do Rio Sangão está localizada na Região Sul do Estado de Santa Catarina.

Ressalta-se que o consumo de água pode aumentar em caso de ocorrência de solos com maiores declividades ou com composição arenosa.

2.6 ECONOMIA DOS RECURSOS NATURAIS

Conforme já comentado, os recursos naturais podem ser classificados em renováveis e não renováveis. A presente seção tem por finalidade apresentar as principais e as mais recentes teorias acerca da exploração sustentável das duas formas de recursos naturais.

2.6.1 Aspectos Gerais

Conrad (1999) estabelece que a pergunta que deve ser feita em relação à alocação de recursos naturais é: “Quanto desse recurso deve ser extraído?”. A melhor alocação possível de recursos naturais em respeito ao tempo consiste em um problema de otimização dinâmica. Em problemas dessa natureza, é comum a tentativa de maximização de um valor econômico líquido futuro, sujeito a restrições de consumo ou outras julgadas importantes. A solução pode ser compreendida como o consumo que deve ser realizado em cada unidade periódica adotada. A melhor extração em determinado período pode, até mesmo, ser nula.

A figura 5, adaptada de Mendes (2006b) apresenta o funcionamento do meio ambiente como produtor de recursos e como receptor de rejeitos.

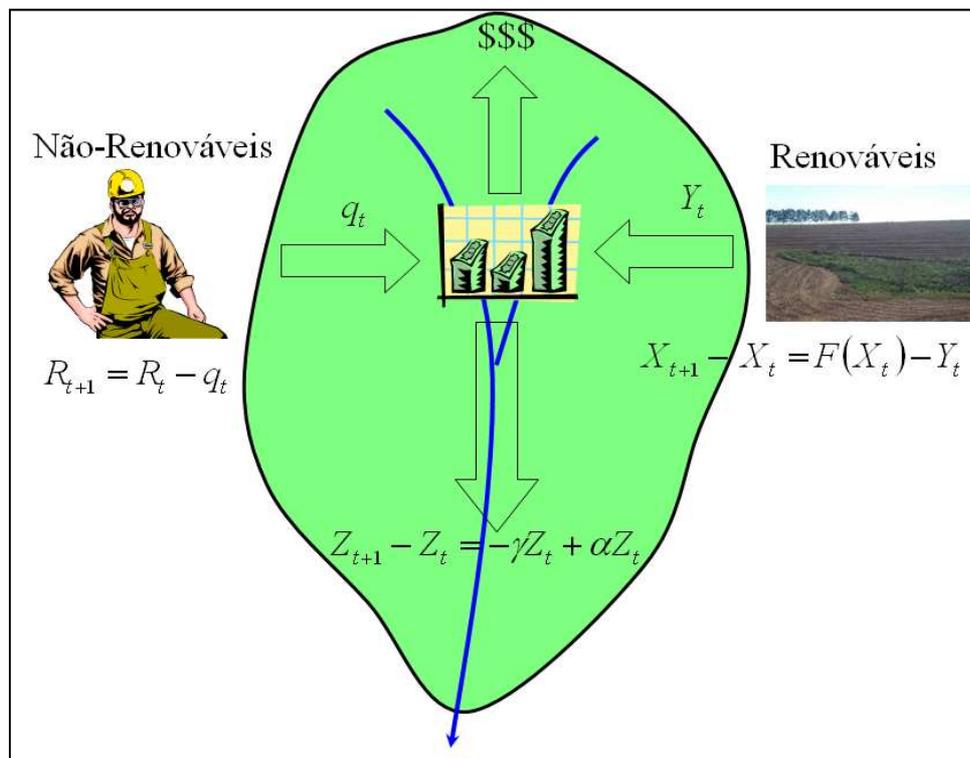


Figura 5: Meio ambiente como produtor de recursos e receptor de rejeitos.

Na figura 5, os símbolos têm os seguintes significados:

- R_t : estoque do recurso natural não renovável no ano t ;
- q_t : taxa de produção do recurso não renovável no ano t ;

- αq_t : geração de resíduos oriundos de q_t , $0 < \alpha < 1$;
- Z_t : quantidade de resíduos acumulada;
- γZ_t : taxa de decomposição (ou de assimilação) do resíduo, $0 < \gamma < 1$;
- X_t : estoque do recurso natural renovável no ano t ;
- Y_t : produção do recurso renovável no ano t ;
- $F(X_t)$: função de crescimento ou de reposição natural.

Em linhas gerais, o aspecto econômico da exploração de recursos naturais pode ser entendido como a maximização de um benefício futuro em face de restrições impostas pela taxa de reposição dos recursos naturais renováveis, pelas reservas de recursos naturais não renováveis e pelo acúmulo de resíduos dessas atividades no meio ambiente.

2.6.2 Exploração Sustentável de Recursos Naturais Renováveis

A população de um recurso natural renovável em um período é denominada estoque e pode ser representada pela variável X_t . Em cada período, o nível de crescimento líquido depende do estoque e é dado pela função $F(X_t)$. Deve-se considerar que existe uma dada capacidade ambiental de sustentação desse estoque. A existência de alimentos em quantidade suficiente assim como a presença de nutrientes no solo são seus limitadores naturais.

O limite máximo do estoque de um recurso natural pode ser representado pela constante K , de modo que: $0 \leq X_t \leq K$. Assim sendo, $F(X_t)$ crescerá até atingir o ponto da Produção Máxima Sustentável em X_{PMS} , onde começará a sofrer decréscimo.

Seja, ainda, Y_t a taxa de extração do recurso renovável, considerando-se que a extração ocorra após seu crescimento ou sua reposição natural. A alteração de estoque do recurso entre os períodos t e $t+1$ pode ser dada conforme a equação 5 (Conrad, 1999; Béné *et al*, 2001; Erdlenbruch *et al*, 2008).

$$X_{t+1} - X_t = F(X_t) - Y_t \quad (5)$$

Percebe-se que, quando a taxa de extração Y_t é maior que a taxa de crescimento ou de reposição $F(X_t)$, o estoque decresce. Caso contrário, o estoque aumenta.

Regev *et al* (1998) mencionam que a dinâmica dos recursos naturais renováveis possui características não só temporais, mas também espaciais que afetam ainda a dinâmica das populações que deles dependem. Além disso, os autores alertam para o fato de que, se o meio ambiente for degradado com certa gravidade, o recurso renovável pode não ser capaz de se restabelecer para a condição de abundância inicial e, em caso de extinção a situação não mais poderá ser revertida. Weinhold (1999) acrescenta que a produtividade da exploração de recursos naturais renováveis deve ser medida em função do tempo e do espaço e propõe um modelo estatístico baseado na função de produção de Cobb-Douglas, explicada adiante.

Smith *et al* (1996) alertam para o problema da troca de área cultivo a cada ano, fato que, além de causar o empobrecimento do solo, ainda agrava o desmatamento. A característica temporal da dinâmica dos recursos naturais renováveis pode estar relacionada não só a efeitos sazonais, mas também a efeitos de larga escala, como o aquecimento global.

Krutilla & Reuveny (2006) tratam do crescimento de uma economia baseada em recursos naturais renováveis. Para os autores, além da dinâmica oriunda do sistema ecológico, deve-se levar em consideração, ainda, a dinâmica populacional humana e a evolução tecnológica. Nos modelos de otimização desenvolvidos pelos autores são encontrados múltiplos estados de equilíbrio, fato que diferencia o estudo em questão. Walker & Homma (1996) relacionam a dinâmica dos recursos naturais renováveis com fatores sociais, tais como: concentração de renda e violência rural. Segundo os autores, a exploração sustentável dos recursos naturais não requer apenas uma solução técnica.

O presente estudo trata apenas da dinâmica espaçotemporal dos recursos naturais renováveis e suas implicações à demanda sobre os recursos hídricos.

A dinâmica do estoque de recurso natural, isto é, a alteração da quantidade existente de recurso no tempo é função da taxa de extração e da taxa de renovação do recurso. Dessa forma, o estudo da exploração sustentável de recursos naturais renováveis passa pelo estudo das funções de crescimento e produção (que depende ainda do esforço empregado para captura ou coleta) e das formas de exploração.

Função de crescimento

A função de crescimento indica a quantidade de biomassa nova ou o número de novos indivíduos de determinada espécie como função da quantidade ou do número atual. Em outras palavras, indica o crescimento biológico líquido (crescimento vegetativo).

As funções de crescimento podem seguir diversos modelos teóricos, dos quais quatro devem ser destacados (Conrad, 1999; Béné *et al*, 2001):

$$F(X_t) = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right); \quad (6)$$

$$F(X_t) = X_t \left[e^{r\left(1 - \frac{X_t}{K}\right)} - 1 \right]; \quad (7)$$

$$F(X_t) = rX_t \ln \left(\frac{K}{X_t}\right); \quad (8)$$

$$F(X_t) = rX_t \left(\frac{X_t}{K_0} - 1\right) \left(1 - \frac{X_t}{K}\right), \quad (9)$$

Nas equações 6 a 9, a constante $r > 0$ representa a taxa de crescimento intrínseco e K a capacidade de suporte ambiental.

Função de Produção

É a função que relaciona a quantidade extraída com a população existente e o esforço de extração. A quantidade extraída é entendida como a variável dependente e as demais como independentes. A forma geral da função de produção é apresentada pela equação 10.

$$Y_t = H(X_t, E_t) \quad (10)$$

Espera-se que as funções dessa natureza sejam côncavas para baixo. As principais formas da função de produção são aquelas dadas pelas equações 11 e 12.

$$Y_t = q_t X_t E_t \quad (11)$$

$$Y_t = X_t (1 - e^{-qE_t}) \quad (12)$$

A equação 11 é uma forma especial da função de Cobb-Douglas (Gailor & Weil, 2000; Dalton *et al*, 2005), $Y_t = q_t X_t^\alpha E_t^\beta$ e também é conhecida como esforço de captura por unidade já que parte da suposição de que a captura por unidade $\left(\frac{Y_t}{X_t}\right)$ é proporcional à população apta a ser capturada (qX_t).

A equação 12 é conhecida como função exponencial de produção.

É importante salientar que as duas funções apresentadas têm comportamentos diferentes quando o esforço de exploração tende ao infinito ($E_t \rightarrow \infty$). Enquanto na função de Cobb-Douglas a produção também tende ao infinito ($Y_t \rightarrow \infty$), na função exponencial há a captura de todos os indivíduos existentes ($Y_t = X_t$).

Conrad (1997) faz um alerta acerca da função de Cobb-Douglas. O autor argumenta que, apesar da tentativa de se basear a economia mundial em recursos naturais renováveis (motivada, entre outros fatores, pela limitação das reservas de recursos não renováveis), são estes que se encontram sob ameaça. A evolução tecnológica e a conseqüente descoberta de novas reservas fizeram com que recursos não renováveis como petróleo e gás natural estejam disponíveis por mais tempo do que se estimava nos anos 70 do século passado. Por outro lado, o aquecimento global e as mudanças climáticas que podem ocorrer causam grandes preocupações sobre as áreas aptas a receber o cultivo de biocombustíveis (substitutos naturais dos combustíveis fósseis).

Função Esforço-Produção

Conforme já apresentado, a quantidade de recurso explorado é dada pela função $Y_t = H(X_t, E_t)$ e, com tal exploração, a quantidade de recurso existente varia do seguinte modo: $X_{t+1} - X_t = F(X_t) - Y_t$. Conrad (1999) mostra que, se a primeira função for substituída na segunda e se a segunda for calculada para o equilíbrio, quando $X_{t+1} = X_t = X$, tem-se que $F(X) = H(X, E)$. Supondo, agora, que esta equação possa ser resolvida para X , em função de E , a equação resultante seria: $X = G(E)$. Substituindo o resultado anterior na função produção, obtém-se o seguinte: $Y = H(G(E), E) = Y(E)$. Assim, a função $Y(E)$ é chamada função de esforço-produção.

Tal função apresenta, em forma matemática, a relação entre o esforço e a obtenção de determinado recurso natural. Esta função deve ser usada para planejamento de exploração em longo prazo com objetivo de garantir a atividade, evitando seu esgotamento precoce.

É possível a obtenção da função de esforço-produção por meio de modelos de regressão. Vera-Diaz *et al* (2008) utilizam-se dessa técnica matemática para obter a função de crescimento da soja na Região Amazônica Brasileira.

2.6.3 Exploração Sustentável de Recursos Naturais Não Renováveis

Os recursos naturais não renováveis não apresentam crescimento ou taxa de renovação em uma escala de tempo relevante para a economia. Desse modo, conhecida a reserva inicial, deve-se planejar a exploração para que seja determinada a quantidade de recurso que deve ser deixado para exploração futura ou, até mesmo, que deve ser preservado.

Seja a reserva inicial de um recurso natural não renovável conhecida e representada por R_0 . O nível de extração no tempo t pode ser dado por q_t . Sem novas descobertas, Conrad (1999) estabelece que a dinâmica do estoque de recurso é dada pela equação 13.

$$R_{t+1} = R_t - q_t \quad (13)$$

Se a sociedade der valor apenas para a utilidade do que foi extraído, ou seja, sem considerar danos ambientais ou externalidades, tem-se a função utilidade conforme equação 14.

$$U_t = U(q_t) \quad (14)$$

Dessa forma, não há razão para deixar de extrair todo o conteúdo da reserva em um tempo T e a dinâmica do estoque do recurso passa a ser mostrada pela equação 15.

$$R_0 - \sum_{t=0}^T q_t = 0 \quad (15)$$

Para que se possa chegar à produção ótima do recurso natural não renovável, o preço do recurso no mercado deve ser reajustado de acordo com a taxa de juros, pois assim não fará diferença para o empreendedor em que período a quantidade q deve ser extraída. Tal assertiva é conhecida como Regra de Hotelling, por ter sido formulada por H. Hotelling (1931) e, em forma matemática, é escrita como mostra a equação 16.

$$p_t = (1 + \delta)^t p_0 \quad (16)$$

Daí, a equação 17 apresenta uma consequência algébrica da equação 16.

$$p_{t+1} = (1 + \delta)p_t \Rightarrow \frac{p_{t+1} - p_t}{p_t} = \delta \quad (17)$$

Em outras palavras, pode-se dizer que o ganho de capital sobre uma unidade de recurso que se possa extrair deve ser equivalente à taxa de desconto para que seja indiferente que a extração ocorra em t ou em $t+1$.

De acordo com Pindyck (1978), há de ser feita a distinção entre um recurso exaurível e um recurso não-renovável. A diferença reside na possibilidade de novas descobertas. Enquanto para o primeiro tipo de recurso não existem novas descobertas a serem realizadas, para o segundo é possível que se aumente a quantidade R_t desde que sejam elevados os esforços de exploração a fim de que sejam detectadas novas jazidas.

Dessa maneira, Conrad e Clarke (1987) estabelecem um modelo da dinâmica de exploração dos recursos não-renováveis. Sejam X_t e W_t , respectivamente, as descobertas acumuladas e o esforço de exploração. Pode-se estabelecer que:

$$\frac{\partial R_t}{\partial t} = \frac{\partial X_t}{\partial t} - q_t \quad (18)$$

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = f(w_t, X_t) \quad (19)$$

Em outras palavras, diz-se que a variação da reserva de recurso com o tempo depende da variação das novas descobertas do recurso com o tempo e da produção mineral. Tal se deve ao fato de a variação das novas descobertas com o tempo $\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)$ depender não só do esforço de exploração, mas também da possibilidade de haver novas descobertas. Partindo dessa definição, compreende-se que:

- $\frac{\partial f}{\partial w} > 0$, pois quanto maior o esforço de exploração, mais descobertas de minério serão feitas; e

- $\frac{\partial f}{\partial X} < 0$, pois à medida que novas descobertas são feitas, menores são as chances de que sejam realizadas outras descobertas, isto é, o recurso não renovável é finito e, em algum momento, não haverá mais reservas a serem descobertas.

A apresentação da teoria de exploração dos recursos naturais não renováveis está baseada nas definições acima mencionadas.

Sejam $C_i(q_{it})$ o custo de extração da i -ésima mineradora, R_i suas reservas iniciais e p o preço de venda do minério em um mercado competitivo. Cada firma tenta maximizar os lucros de acordo com a seguinte formulação matemática, na qual δ refere-se à taxa de juros:

$$\text{Max } \pi = \int_0^{T_i} (p_t q_t - C(q_t) - C(w_t)) e^{-\delta t} dt \quad (20)$$

Sujeito a:

$$R_{t+1} - R_t = f(w_t, X_t) - q_t \quad (21)$$

$$R_{i0} = R_i \quad (22)$$

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = f(w_t, X_t) \quad (23)$$

$$X_0 = 0 \quad (24)$$

As restrições significam respectivamente que:

- A variação da reserva com o tempo é igual, em módulo, à diferença entre as descobertas, quando há, e à produção da mina;
- A reserva inicial de cada mina é igual à reserva total estimada (ou medida) de cada mina;
- As novas descobertas são uma função do esforço para realizá-las e da quantidade de descobertas já realizadas;

- A descoberta inicial é nula.

Em tese, exceto no caso monopolista, uma firma não pode saber o preço p_t a assumir na função objetivo. Em um mercado competitivo, portanto, a i -ésima mineradora é uma “tomadora” de preços e trata p_t como variável exógena.

Dada a dinâmica de exploração dos recursos naturais não renováveis, deve-se ainda considerar dois tópicos: a atribuição de valor econômico aos danos ambientais e a análise da situação sob o ponto de vista da sociedade, conforme Henderson (1976), Pyndick (1978), Conrad; Clarke (1987). São apresentadas a seguir algumas considerações sobre tais tópicos.

Função Dano Ambiental

Considera-se como Função Dano aquela que relaciona o estoque de poluentes com o dano financeiro que a economia sofre no tempo t . Em modelos estáticos de poluição, o dano depende apenas do nível das emissões. Com o estoque sofrendo alterações no tempo, os resíduos gerados em t causarão danos ambientais a partir de $t+1$. Portanto, o dano ambiental relaciona-se com os custos provocados pelo acúmulo de resíduos no meio ambiente.

Apesar de representar os custos financeiros devidos à geração de resíduos, a função dano apresenta duas interpretações. A primeira delas é aquela em que o acúmulo de poluentes no meio provoca custos em terceiros. Neste caso, outros agentes, empreendedores ou a sociedade ou ambos, despendem recursos financeiros para realizar suas atividades por causa da presença de substâncias nocivas acumuladas no meio (externalidades). Para essa situação, a função dano representa tais custos extras incidentes sobre as atividades de terceiros.

A segunda interpretação representa o cenário econômico ideal, ou seja, com a internalização dos efeitos externos. Assim, os custos das externalidades são evitados por ações de controle e tratamento de resíduos. Neste caso, a função dano representa o montante gasto pelo empreendedor para evitar que custos extras incidam em outras atividades.

A função dano apresenta concavidade para cima, isto é: $D' > 0$ e $D'' > 0$. Isto se deve ao fato de que, para uma dada substância, quanto maior seu despejo no meio ambiente, maior serão os custos causados em terceiros ou maior serão os custos para evitá-los. Na figura 6 é apresentado o gráfico simbólico da função dano.

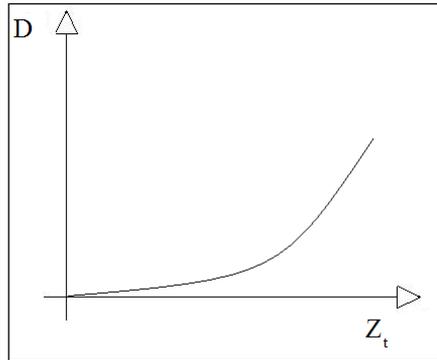


Figura 6: Custo (D) em função do acúmulo de resíduos no meio ambiente (Z_t).

A forma da curva depende da toxicidade do resíduo. Quando não se dispõe de dados suficientes, é possível adotar a forma em degraus. A função em degraus estabelece faixas crescentes de estoque de poluentes para determinado nível de dano, ou seja, o dano será o mesmo para determinada faixa de valores de Z_t .

A dificuldade da função dano consiste na estimação do dano financeiro causado pelo acúmulo de resíduos no meio ambiente. Tal estimação pode envolver a tarefa de atribuir valor a determinada espécie animal ou vegetal ou a de avaliar financeiramente a mortalidade humana ou a redução da expectativa de vida.

Em geral, os danos causados pelo acúmulo de resíduos no meio ambiente são avaliados em forma de negócios perdidos, custos hospitalares e disposição que as pessoas têm para pagar para se manter saudáveis ou para prevenir doenças causadas pela poluição. Mas também podem ser calculados a partir do valor gasto para tratamento ou destinação correta dos resíduos gerados.

Os resíduos gerados pelas atividades podem ser classificados, de maneira geral, como degradáveis ou não degradáveis. Os resíduos degradáveis são aqueles que passam por algum processo químico ou biológico capaz de decompô-los em substâncias que causam pouca ou nenhuma ameaça ao ambiente natural.

Os resíduos não degradáveis, por outro lado, apenas fazem crescer o estoque de poluentes no meio ambiente. Algumas vezes, sofrem o fenômeno de difusão, o qual, apesar de diminuir a concentração local do poluente não altera sua massa total considerando o sistema como um todo.

O controle do estoque de poluentes no tempo é representado pela equação 25:

$$Z_{t+1} - Z_t = -\gamma Z_t + \alpha q_t \quad (25)$$

O termo negativo no lado direito da equação se refere à parte biodegradável do resíduo e o termo positivo à parte não degradável. O lado esquerdo da equação representa a diferença das quantidades de resíduos em dois períodos consecutivos.

Seja $S_t = \alpha q_t$ o fluxo de resíduos oriundos da extração de q_t unidades de um recurso natural não renovável. Assume-se que a taxa de geração de resíduos é proporcional à quantidade de recurso extraída. Seja, ainda, Q_t a taxa de produção de alguma *commodity*. Denota-se $\Phi(Q_t, S_t) = 0$ a curva que delimita a fronteira de transformação *commodity*-resíduo.

Dependendo da agressividade do resíduo gerado, pode-se optar pela produção mínima (Q_{\min}) para que não sejam gerados resíduos ou que estes sejam gerados em quantidades mínimas. Por outro lado, pode-se decidir pela produção máxima, aceitando-se a geração máxima de resíduos. A decisão não envolve apenas a quantidade produzida e a geração de resíduos, mas também os custos relativos aos danos ambientais. Em caso de danos ambientais com altos custos à sociedade, pode ser preferível uma produção pequena e, em consequência uma receita menor, mas com uma geração menor de resíduos a uma produção em larga escala causando prejuízos ambientais.

Função de Bem Estar Social

Uma vez que os critérios de avaliação da função dano tenham sido estabelecidos, a função de bem estar social é de fácil obtenção. O bem estar social, representado por W_t , é função tanto da taxa de extração de recursos (Q_t) quanto do estoque de poluentes (Z_t) e pode ser dado pela diferença entre as funções lucro de cada atividade (π), e o dano ambiental (D). Ressalta-se que a função de bem estar social constitui-se tão somente em uma função de renda líquida agregada dos agentes, o que desconsidera efeitos distributivos.

O lucro de cada atividade consiste na diferença entre as receitas obtidas pela venda do produto e as despesas necessárias para produzi-lo. A função lucro é côncava para baixo, pois apresenta $\pi' > 0$ e $\pi'' < 0$. Em outras palavras, pode-se dizer que, para uma dada tecnologia de produção, haverá um limite em que os custos de extração se tornarão impeditivos para a realização de lucro, pois os recursos se tornam mais raros e difíceis de serem encontrados ou retirados. Na figura 7 apresenta-se o gráfico simbólico da função lucro.

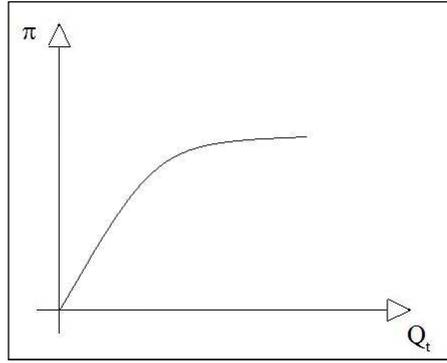


Figura 7: Lucro (π) x quantidade produzida em um intervalo de tempo (Q_t).

Pode-se dizer, então, que a função de bem estar social tem a seguinte forma geral:

$$W_t = W(Q_t, Z_t) = \pi(Q_t) - D(Z_t) \quad (26)$$

A referida função pode ser classificada como aditivamente separável e reflete a crença de que os danos ambientais provocados pelas atividades econômicas devem ser descontados da produção total de bens e serviços.

Assim, segundo Henderson (1976), Pyndick (1978) e Conrad (1987), o modelo de exploração econômica dos recursos naturais não renováveis deve ser a maximização do bem-estar social em face dos custos provocados pelo lançamento de resíduos no meio, conforme formulação matemática apresentada pelas equações 27, 28, 29, 30 e 31.

$$\text{Max } W = \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t [\pi(Q_t) - D(Z_t)] \quad (27)$$

$$\text{Sujeito a: } Z_{t+1} - Z_t = -\gamma Z_t + \alpha q_t \quad (28)$$

$$\phi(Q_t, S_t) = 0 \quad (29)$$

$$Q_{\text{máx}} \geq Q_t \geq Q_{\text{mín}} \quad (30)$$

$$Z_0 \text{ conhecido.} \quad (31)$$

Sendo o estoque de poluentes uma função da quantidade produzida, a solução do problema dado pelas equações 27 a 31 pode ser representada pela figura 8.

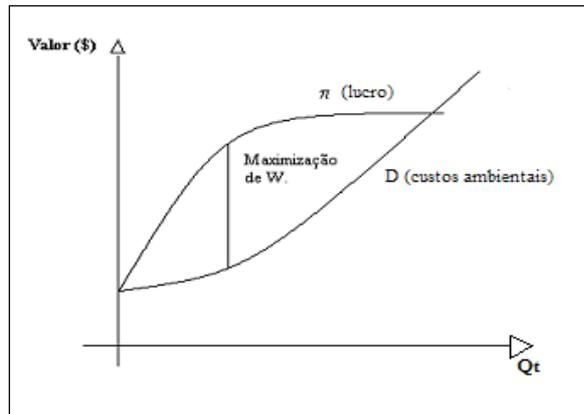


Figura 8: Maximização do bem estar social.

Percebe-se que a otimização ocorre quando a distância entre o lucro e os gastos com o estoque de poluentes atinge seu nível máximo.

2.7 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

As técnicas de otimização podem ser entendidas como uma ferramenta de suporte à tomada de decisão. Segundo Lanna (2002), ela é empregada quando a análise do sistema exige o interesse em avaliar o processo decisório de acordo com uma valoração estabelecida por uma função objetivo.

Os problemas de otimização podem ser classificados em determinísticos, estocásticos ou híbridos; em estáticos ou dinâmicos em relação ao tempo; em linear ou não linear; podem consistir de variáveis contínuas, discretas ou inteiras ou de uma combinação de tais variáveis. Dentre os métodos para resolução desse tipo de problema merecem atenção aqueles compostos por técnicas de programação matemática. Como exemplo de tais técnicas, há os multiplicadores de Lagrange, a programação linear, a programação não-linear, a programação dinâmica, a programação quadrática e a programação inteira. No entanto, o método terá sempre uma (ou mais de uma) função objetivo a ser otimizada. No que diz respeito ao planejamento e à gestão de recursos hídricos, Loucks & Beek (2005) destacam o emprego de métodos de otimização para os seguintes problemas: dimensionamento e/ou operação de

reservatórios, gerenciamento de qualidade da água e desenvolvimento ou operação de áreas irrigadas.

Conforme Barros (2002), a Programação Dinâmica é mais adequada para problemas que contenham decisões sequenciais dentro de um contexto de otimização. Em Recursos Hídricos pode-se destacar a aplicação da referida técnica em problemas de alocação de água, operação de sistemas de reservatórios e expansão da capacidade de abastecimento. A Programação Dinâmica em sua forma básica se estrutura com as seguintes funções: objetivo, mudança de estado, restrições e recursiva. O equacionamento desse tipo de programação é discutido por Loucks & Beek (2005), Votrubá & Broza (1998), Mays & Tung (1992), Jacobs (1995) e Braga *et al* (1985), entre outros.

Barbosa (2002) argumenta que a Programação Linear é a técnica mais conhecida e usada na solução de problemas de otimização. Ainda segundo o autor, o tipo mais comum de aplicação consiste em alocar recursos limitados a atividades competitivas, de maneira ótima. Em Recursos Hídricos, cabe destacar a aplicação da Programação Linear em problemas de alocação de água e no dimensionamento e na operação de reservatórios (STROBEL, 1979).

A Programação Não Linear é aplicada nos mesmos tipos de problemas abordados pela Programação Linear quando não se pode evitar a ocorrência de termos de ordem quadrática ou superior. Cirilo (2002) menciona que as técnicas de programação não linear evitam que seja feita a linearização de equações para utilização da Programação Linear. Tal procedimento levava à perda de precisão, mas se justificava, pois as técnicas de programação não linear exigiam computadores mais potentes. Dentre outros estudos, destacam-se os trabalhos pioneiros de Kuhn & Tucker (1951) e Rosenbrok (1960).

Pode-se dizer que nenhum dos métodos de resolução de problemas de otimização se mostrou o melhor para todos os tipos de abordagem de planejamento e gestão de recursos hídricos. Cada um deles tem suas vantagens e limitações e, por isso, seu emprego deve ser analisado caso a caso.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no presente trabalho consiste na elaboração de um modelo de otimização da alocação de água entre as atividades de mineração de carvão e de cultivo de arroz irrigado e na análise dos resultados em diversos cenários. Para tanto é necessária a busca de dados para que seja possível a construção das funções econômicas e das restrições impostas pela bacia hidrográfica considerada e pela dinâmica dos recursos naturais. De posse das funções econômicas, realiza-se a formulação da função objetivo. As características das jazidas, da bacia hidrográfica e do cultivo fornecem as restrições à função objetivo. Assim, o modelo é aplicado e de posse de seus resultados são analisados diversos cenários. A figura 9 ilustra a metodologia adotada.

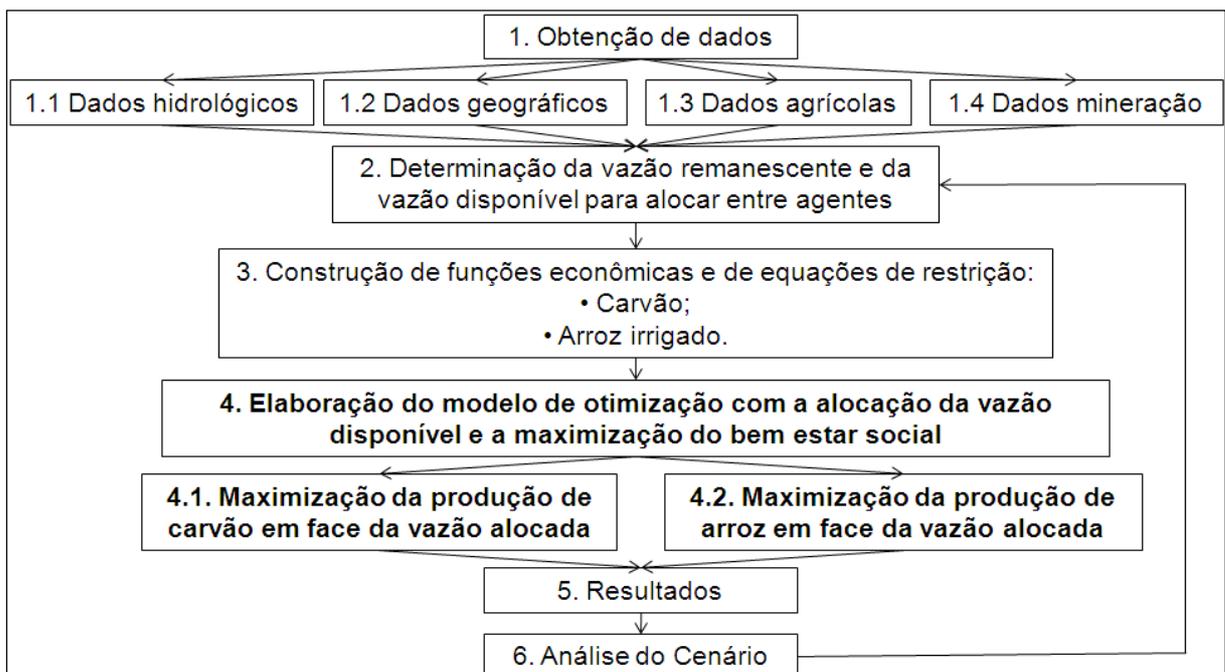


Figura 9: Fluxograma metodológico.

Nos itens 3.1 a 3.5 é explicado cada tópico mencionado.

3.1 OBTENÇÃO DE DADOS

Os dados necessários para o modelo de otimização a ser proposto podem ser divididos nas seguintes categorias: dados hidrológicos, dados geográficos, dados relacionados à mineração de carvão e dados relacionados à cultura de arroz irrigado. A tabela 6 exhibe os dados necessários ao desenvolvimento do estudo. Tais dados, apresentados sob a forma de variáveis de entrada, são, em seguida, classificados quanto à área a que são afetos.

Tabela 6: Variáveis de entrada do modelo.

VARIÁVEIS DE ENTRADA	VARIÁVEIS DA BACIA	
	$Q_{\text{mensal}}(i,t)$	Vazão mensal nos cursos d'água
	$P(t)$	Precipitação mensal
	$Lim(l)$	Limite tolerável de cada contaminante
	VARIÁVEIS DE EXPLOTAÇÃO DE CARVÃO	
	i	Agentes mineiros na bacia
	$T(i)$	Tempo de operação dos agentes
	$A(i)$	Área impactada por cada agente mineiro
	$R(i)$	Reserva a ser explorada ou produção do agente i
	$p1$	Preço da tonelada de carvão
	ϵ	Percentual de rejeitos no carvão
	ex	Alternativas de exploração
	$CExp(i)$	Custo de exploração
	$CBen(i)$	Custo de beneficiamento do carvão
	δ	Taxa de juros
	VARIÁVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES MINEIROS	
	j	Alternativas de tratamento de efluentes
	$CTrat(i,j)$	Custo do tratamento j de efluentes do agente i
	l	Contaminante considerado
	$Conc(l,i)$	Concentração do contaminante l no efluente do agente i
$\eta(l,i)$	Percentual remanescente do contaminante l no agente i	
VARIÁVEIS AGRÍCOLAS		
k	Número de empreendimentos agrícolas (arroz irrigado)	
$T(i)$	Tempo de operação agrícola da área	
$AP(k)$	Área plantada	
$SC(k)$	Sistema de cultivo utilizado	
$DemHíd(sc)$	Demanda hídrica do sistema de cultivo utilizado	
$Prod(sc)$	Produtividade do sistema de cultivo utilizado	
$p2$	Preço da tonelada de arroz	
$CProd(sc)$	Custo de Produção	

3.1.1 Dados da Bacia

A importância dessa etapa relaciona-se com o fato de que as vazões dos cursos d'água que compõem a bacia escolhida são elementos restritivos da descarga de poluentes da mineração de carvão e da captação de água para irrigação do arroz. Em outras palavras, pode-

se dizer que quanto menor for o volume d'água disponível no corpo receptor, menores deverão ser as descargas de poluentes (que implica maiores custos de tratamento dos resíduos) e menor deverá ser a área irrigada (implicando menor produção de arroz).

Embora a revisão da literatura aponte como importante preocupação do planejamento de uso dos recursos hídricos a manutenção de uma vazão capaz de garantir o funcionamento do ecossistema a jusante, a presente metodologia se concentra na reserva de parte da vazão para outros usos que não os já considerados no modelo (mineração de carvão e cultivo de arroz irrigado). Dentre os usos possíveis para a vazão reservada pode ser incluída a manutenção do ecossistema a jusante. A opção pela reserva para outros usos se justifica em virtude do fato de que o cálculo da vazão para a manutenção do funcionamento do ecossistema está fora do escopo do trabalho. A vazão reservada é, portanto, referida no presente trabalho como vazão remanescente.

A descarga de poluentes relaciona-se com a precipitação incidente sobre a bacia. A percolação de águas pluviais pelas pilhas de resíduos, e por toda a área minerada, é responsável pela dissolução e pelo transporte de poluentes aos cursos d'água. Em paralelo, a abundância de chuvas provoca menor necessidade de irrigação da cultura de arroz.

Dessa forma, necessita-se da série histórica de vazões mensais dos cursos d'água da bacia nos quais se localizam as referidas atividades, de precipitações mensais nos locais em que existam minas em exploração e que existam cultivos e de vazões fornecidas pelos aquíferos subterrâneos em locais onde houver lavra subterrânea.

De posse das séries históricas, é possível gerar previsões para o período em que se considera a aplicação do modelo. O modelo consiste, portanto, na geração de vazões aleatórias dadas pela série histórica.

A vazão remanescente pode ser determinada com base apenas em dados hidrológicos ou com base na necessidade da água para outros usos.

A vazão disponível é obtida com uso da equação 32:

$$Q_{disponível}(mês) = Q_{mensal}(exutório, mês) - Q_{remanescente}(mês) \quad (32)$$

Portanto, para um determinado mês, a vazão disponível resulta da diferença entre a vazão mensal no exutório da bacia considerada e a vazão remanescente.

3.1.2 Dados Geográficos

Os dados geográficos consistem na delimitação da bacia de estudo, na determinação de sua rede hidrográfica, na determinação da localização de cada agente (minas e áreas de cultivo) considerado no modelo.

Caso não se disponha de informações prévias, a delimitação da bacia de estudo e a determinação de sua rede hidrográfica podem ser obtidas a partir de imagens do tipo Modelo Digital de Elevação do terreno.

Em relação à localização dos agentes considerados, deve-se realizar a classificação de uso do solo. Da mesma forma que a delimitação e a determinação da rede hidrográfica da bacia, caso não se disponha de informações prévias, deve-se recorrer às imagens de satélite. Neste caso, entretanto, deve-se obter imagens que reproduzam a radiação refletida pelo terreno. Além disso, deve-se ter conhecimento dos padrões de reflectância de cada uso do solo efetuado pelos agentes considerados.

Pode-se, ainda, recorrer às imagens do Google Earth, disponíveis na internet.

3.1.3 Dados Agrícolas

Os dados agrícolas são:

- Número e localização das áreas de cultura de arroz irrigado (k);
- Tempo considerado para alocação de água ($T(i)$);
- Área plantada pelo empreendedor k : $AP(k)$;
- Sistema de cultivo utilizado pelo empreendedor k : $SC(k)$;
- Demanda Hídrica por hectare em função do sistema de cultivo utilizado pelo empreendedor k : $DemHíd(sc)$;

- Produtividade (toneladas por hectare) em função do sistema de cultivo adotado pelo empreendedor k : $Prod(sc)$;
- Preço da tonelada de arroz: p_2 ;
- Custo de produção do arroz irrigado em função do sistema de cultivo adotado: $CProd(sc)$.

3.1.4 Dados Relacionados à Exploração do Carvão Mineral

Para a extração do minério, serão considerados os seguintes parâmetros:

- Número e localização das minas (i);
- Tempo de exploração da mina i ($T(i)$);
- Reserva a ser explorada pela mina i : $R(i)$;
- Preço da tonelada de carvão mineral (p_1);
- Percentual de rejeitos contidos na produção de carvão (ϵ);
- Alternativa de exploração adotada pela mina i (ex);
- Custo da extração de carvão mineral por tonelada, de acordo com a tecnologia a ser adotada para a mina i ($CExt(i)$);
- Taxa mensal de inflação (δ).

Considera-se conhecida a quantidade de minério a ser explorada e/ou beneficiada.

3.1.5 Dados Relacionados ao Tratamento de Efluentes

Para o tratamento de resíduos, existem os seguintes parâmetros específicos:

- Alternativa de tratamento (j);
- Valor necessário à construção e à operação das instalações correspondentes à execução do tratamento adotado por determinada mina (M_{0ij});

- Contaminantes considerados no rejeito (l);
- Concentração do contaminante l na drenagem ácida da mina i (Conc(l,i));
- Percentual do contaminante l remanescente no efluente após aplicação da alternativa de tratamento j ($\eta(l,j)$).

Consideram-se conhecidos os custos de implantação e de manutenção de cada alternativa de tratamento, bem como seu potencial de redução de cada contaminante.

3.2 CONSTRUÇÃO DE FUNÇÕES ECONÔMICAS E DE EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO

As funções econômicas necessárias para o desenvolvimento do modelo dizem respeito tanto à mineração de carvão quanto à cultura de arroz. Em relação à mineração, têm-se: a receita da mineradora, seus custos de extração e de beneficiamento e seus custos de tratamento de efluentes. No que diz respeito ao arroz irrigado, considera-se apenas a receita gerada pela atividade e o custo de produção.

3.2.1 Funções Econômicas da Mineração de Carvão

A receita da mineradora pode ser dada pelo produto entre a quantidade de minério por ela produzida (*run of mine*) e o preço unitário do carvão mineral, descontando-se a quantidade de resíduos presentes por tonelada de ROM:

$$Receita_carvão = p1 \cdot q(i,t) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (33)$$

Os custos de extração do carvão mineral dependem da tecnologia de extração adotada pela empresa ou analisada no cenário proposto. Assim, com base nos dados apresentados formula-se a equação 34.

$$Extração = CExp_{ex}(i) \cdot q(i,t) \quad (34)$$

Os custos de beneficiamento do carvão mineral são dados pela equação 35.

$$Beneficiamento = CBen(i) \cdot q(i,t) \quad (35)$$

O valor total dos custos de tratamento de efluentes (M_{0ij} na equação 36) é dividido em parcelas mensais ao longo do tempo de exploração da mina.

Assim, as parcelas do custo de tratamento j ($CTrat_j$) são dadas pela equação 36.

$$CTrat_j(i) = \frac{M_{0ij} (1 + \delta)^t \delta}{(1 + \delta)^t - 1} \quad (36)$$

As restrições consideradas no modelo são referentes ao balanço de massa e à concentração de poluentes nos cursos d'água. O balanço de massa é dado pela equação 37.

$$R(i, t) = R(i, t - 1) - q(i, t) \quad (37)$$

No entanto, deve ser considerada a reserva a ser explorada em cada jazida, bem como o seu esgotamento ao final do tempo de exploração. Tais restrições são dadas, respectivamente, pelas equações 38 e 39.

$$R(i, t = 0) = R \quad (38)$$

$$R(i, t = T) = 0 \quad (39)$$

Para a concentração de poluentes nos cursos d'água são necessários os seguintes parâmetros:

- Seções dos rios onde são analisados os limites de concentração de contaminantes. Tais seções são aquelas nas quais as minas despejam seus efluentes e, por isso, também recebem o símbolo (i);
- Limite de concentração tolerável do poluente l ($Lim(l)$);
- Vazão mensal do rio no trecho considerado e no tempo t ($Q(i, t)$).

Seja, ainda, a carga de poluentes despejada nos rios da bacia hidrográfica em estudo dada pelo produto entre a vazão do efluente do tratamento e a concentração de cada contaminante após o devido tratamento. Assim, formula-se a equação 40.

$$Carga(l, i, t) = Q_{efluente}(i, t) * \eta(i, t) * Conc(l, i) \quad (40)$$

A vazão alocada para cada mina corresponde à quantidade de água utilizada para diluição de seus efluentes. Portanto, deve-se dividir o valor encontrado na equação 40 pela vazão alocada para a mina i no mês em questão. Então, a contaminação causada por uma mina pode ser escrita conforme a equação 41.

$$Cont(l,i,t) = \frac{Q_{efluente}(i,t) * \eta(i,t) * Conc(l,i)}{Q_{alocada}(i,t)} \quad (41)$$

A vazão efluente de cada mina varia com o tempo, pois para cada tonelada de minério extraída é necessária uma quantidade de água (K) para que se consiga separar os resíduos. Dessa forma a vazão efluente mensal ($Q_{efluente}$) originada por cada mina pode ser dada pela equação 42.

$$Q_{efluente}(i,t) = K * q(i,t) \quad (42)$$

De posse de tais parâmetros, obtém-se o conjunto de restrições dado pela equação 43.

$$\frac{Q_{efluente}(i,t) * \eta(i,t) * Conc(l,i)}{Q_{alocada}(i,t)} \leq Lim(l) \quad (43)$$

O parâmetro $Lim(l)$ diz respeito à concentração permitida para determinado contaminante. Cabe salientar que por se tratar de substâncias inorgânicas pouco aproveitadas por organismos vivos, não é considerado o fenômeno de autodepuração dos cursos d'água.

Valores mínimos e máximos para a produção também serão considerados como conhecidos.

A função objetivo será trazida a valor presente de acordo com a equação 44.

$$\rho = \frac{1}{1 + \delta} \quad (44)$$

Portanto a rotina de maximização da produção de carvão é dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \rho^t [p \cdot q(i,t) \cdot (1 - \varepsilon) - CExp_{ex}(i) \cdot q(i,t) - CBen \cdot q(i,t) - CTrat_j(i)] \quad (45)$$

Sujeito a:

$$R(i, t = 0) = R(i); \quad (46)$$

$$R(i, t) = R(i, t - 1) - q(i, t); \quad (47)$$

$$R(i, t = T) = 0; \quad (48)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m Q_{efluente}(i, t) * \eta(i, t) * Conc(l, i)}{Q_{alocada}(i, t)} \leq Lim(l) \quad (49)$$

$$q_{mínimo}(i, t) \leq q(i, t) \leq q_{máximo}(i, t) \quad (50)$$

3.2.2 Funções Econômicas da Cultura de Arroz Irrigado

A receita dos empreendedores agrícolas é dada pelo produto entre a quantidade de arroz produzida e seu preço unitário.

$$Receita_prod_arroz = p2 \cdot Y(k, t) \quad (51)$$

Os custos de produção do arroz dependem sistema de cultivo adotado pelo empreendedor no cenário proposto. Assim, com base nos dados apresentados formula-se a equação 52.

$$Custo\ Produção = C\ Pr\ od(sc) \cdot Y(k, t) \quad (52)$$

A vazão alocada para cada empreendedor agrícola corresponde à quantidade de água utilizada para irrigação durante o período de plantio do arroz. Portanto, a produção do referido insumo está condicionada à quantidade de água disponível para irrigação somada à precipitação do período de irrigação. Dessa forma, a equação 53 apresenta o conjunto de restrições dado pela função esforço-produção.

$$Y(k, t) \leq \frac{\left(\sum (Q_{alocada}(k, t) + Prec(k) * Área(k)) \right) * Pr od(sc)}{DemHíd(sc)} \quad (53)$$

A função objetivo é trazida a valor presente pela equação 44.

Portanto, a rotina de maximização da produção de arroz é dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$\text{Max} \quad \sum_{t=1}^T \rho^t [p2 \cdot Y(k,t) - C \text{Prod}(sc) \cdot Y(k,t)] \quad (54)$$

Sujeito a:

$$Y(k,t) \leq \frac{\left(\sum (Q_{alocada}(k,t) + \text{Prec}(k) * \text{Área}(k)) \right) * \text{Prod}(sc)}{\text{DemHíd}(sc)} \quad (55)$$

$$AP_{\text{mínima}} \leq \frac{Y(k,t)}{\text{Prod}(sc)} \leq AP_{\text{máxima}} \quad (56)$$

A equação 56 diz respeito à restrição de área, ou seja, supõe-se haver uma área mínima a ser plantada e uma área máxima igual à área total que o empreendedor dispõe para o cultivo de arroz.

3.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Para a aplicação do modelo adota-se a discretização mensal do tempo para atividades mineiras, e anual para as atividades agrícolas. A discretização visa à simplificação dos cálculos computacionais, bem como a redução de incertezas relacionadas à medição da vazão em menores intervalos de tempo.

A função objetivo do modelo de otimização é composta pelo somatório no tempo da soma total da renda líquida gerada tanto pelas empresas operadoras das minas e das usinas de beneficiamento instaladas na bacia de estudo como pelos empreendedores agrícolas. Na equação 56, W se refere ao bem estar social que, por sua vez, é entendido como a renda total líquida das duas atividades.

$$W = (\text{Receita}_{\text{carvão}} - \text{Extração} - \text{Benef} - C\text{Trat}) + (\text{Receita}_{\text{arroz}} - \text{Produção}) \quad (57)$$

Em outras palavras, trata-se da maximização do valor presente líquido (VPL) de tais atividades sob a consideração da quantidade de água disponível para despejo de efluentes e para irrigação. Sua maximização será restringida pelo balanço de massa da reserva

carbonífera, pela quantidade de água disponível para irrigação do arroz e pelo limite de concentração de contaminantes nos cursos d'água.

Matematicamente:

$$\text{Max} \quad \sum_{t=1}^T \rho^t W \quad (58)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m Q_{alocada}(m, t) \leq Q_{disponível}(t). \quad (59)$$

O parâmetro “m” na equação 59 corresponde a cada um dos agentes instalados na bacia considerada.

A consideração da aleatoriedade obriga que a formulação matemática acima seja executada por diversas vezes para que se consiga um resultado satisfatório.

O modelo de otimização consiste em um problema de programação dinâmica onde cada agente instalado na bacia é um estágio decisório, já que a quantidade de água para ele alocada diminuirá a quantidade de água disponível para os outros agentes. Para cada um dos agentes, há alternativas de alocação de água dadas por parcelas da quantidade de água disponível.

3.4 RESULTADOS

Os resultados do modelo são as distribuições probabilísticas dos valores de $q(i,t)$ e de $Y(k,t)$ obtidos para cada simulação. Isto significa a produção ótima de carvão mineral de cada mina no intervalo de tempo analisado e produção ótima de arroz por cada área cultivada. Também são geradas as concentrações de cargas poluentes nos trechos de rio analisados e as quantidades de água alocadas para cada empreendimento. Com base nestes valores poderá ser verificada a receita das empresas ao longo desse intervalo, bem como seus custos de exploração, produção e tratamento de efluentes.

3.5 ANÁLISE DE CENÁRIOS

São analisados diversos cenários a partir da variação da vazão remanescente, da tecnologia de manejo de resíduos e dos limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357.

Não são analisadas as situações de enquadramento nas classes especial, 2 e 4. A análise do enquadramento da bacia na classe especial não se faz necessária, tendo em vista que o artigo treze da referida legislação estabelece que nesta classe devem ser mantidas as condições naturais do curso d'água. Em relação à classe 4, o artigo 17 não estabelece restrições às substâncias presente na DAM. A classe 2, é uma situação intermediária entre as classes analisadas (1 e 3) e, por isso, não é considerada.

No Capítulo 4 é apresentada a área de estudo.

4 **ÁREA DE ESTUDO**

Existem na Área Carbonífera do Estado de Santa Catarina três bacias hidrográficas integrantes da Bacia do Atlântico Sudeste: a do Rio Araranguá, a do Rio Tubarão e a do Rio Urussanga. O registro das atividades de uso do solo local foi realizado pelo CETEM a pedido do Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina no ano 2000. A área possui o solo dividido entre as seguintes categorias: mineração, vegetação e cultivos, área urbana, solo exposto e campos, bem como cultivos em áreas alagadas (CETEM, 2001). A seguir, são expostas as características gerais da bacia e dados para execução do modelo.

4.1 **CARACTERÍSTICAS GERAIS**

A bacia do Rio Sangão faz parte da bacia do Rio Araranguá. A bacia do Araranguá drena os territórios de 11 municípios, dentre os quais se destacam Araranguá e Criciúma. Possui uma superfície de 3.020 km²; vazão média de 40 m³/s, e uma densidade de drenagem de 1,95 km/km². Esta bacia, cujas nascentes ficam na Serra Geral e cujo rio principal se forma a partir da confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia, é composta por aproximadamente 15 cursos d'água, dentre os quais merecem citação: Mãe Luzia, Amola Faca, dos Porcos, Jundiá, Turvo e São Bento. De acordo com dados do antigo DNAEE (atual ANEEL), a sub-bacia em pauta tem seus índices máximos de vazão entre janeiro e abril, sendo que as vazões mínimas (média de 18 m³/s) ocorrem de julho a setembro (FREITAS, 1999).

A figura 10 apresenta as três bacias da área carbonífera em detalhe. O polígono destacado evidencia o local onde há a atividade de exploração de carvão mineral.

Também possui caráter relevante a reserva de água subterrânea da Bacia Carbonífera. Ocorrem duas categorias de aquíferos na região. As rochas cristalinas, graníticas ou basálticas, constituem os aquíferos do tipo fraturado e as rochas sedimentares gonduânicas e os sedimentos terciário-quadernários constituem os aquíferos por porosidade granular. A vulnerabilidade e o risco de contaminação dessas fontes de água pela indústria de extração de carvão são, em geral, altos, com exceção para aqueles encimados por espessos pacotes de rochas pelíticas pouco permeáveis. As descargas de águas contaminadas (por DAM) nos aquíferos e a captação de águas subterrâneas para irrigação não são consideradas no estudo.

4.2 A ECONOMIA DA REGIÃO

A lavra e o beneficiamento do carvão mineral no sul de Santa Catarina apresentaram-se, desde os seus primórdios, como atividades econômicas fundamentais ao desenvolvimento de toda a região e, desde o início de sua exploração econômica, o carvão teve a sua comercialização atrelada a decisões governamentais.

A mineração do carvão sempre exerceu um papel dominante na economia da região sul do estado de Santa Catarina, com destaque para os municípios de Araranguá, Criciúma e Tubarão. A participação do carvão na economia da região atingiu 30% do PIB na década de 70. Na década de 80, sua participação esteve entre 28,7 e 33,3%. Nos anos 90, mesmo com o declínio da produção, sua contribuição foi de 20,4 a 25,6% para o PIB da região. Em municípios onde há pouca diversificação da economia, como Lauro Müller e Siderópolis, o carvão contribuiu com até 85% da produção industrial (SIECESC, 1996).

A indústria carbonífera catarinense atingiu seu auge na década de 80, chegando a empregar cerca de 11.000 trabalhadores e prover a subsistência de mais de 66.000 pessoas (CETEM, 2001). Assumindo a participação de atividades periféricas, tais como o comércio e o setor portuário, com igual importância às da mineração, o impacto total sobre o número de empregos na indústria carbonífera poderia ser estimado em 38.000, os quais mantinham mais de 220.000 pessoas na década de 80. A partir de 1990, a produção anual de carvão brasileiro praticamente estabilizou-se entre cinco e seis milhões de toneladas, apresentando, portanto, redução em relação à década de 80 quando se situou próximo de oito milhões de toneladas (CETEM, 2001).

Nas últimas décadas, a produção industrial vem tendo um expressivo crescimento, com destaque para a indústria de cerâmica. De modo similar, a agricultura apresentou grande desenvolvimento, principalmente na lavoura de arroz irrigado. Outra atividade que merece ser destacada é a tradicional produção de suínos, atividade altamente poluente dos recursos hídricos, que despeja nos mananciais grande quantidade de coliformes fecais (SANTA CATARINA, 1997a).

Ressalta-se que a atividade de extração de carvão mineral se desenvolve na região desde 1885 (GOTHE, 1993) e, assim, várias minas abandonadas podem ser encontradas no local, descarregando águas contaminadas nos cursos d'água superficiais.

4.3 A SUB-BACIA DO RIO SANGÃO

O Rio Sangão apresenta-se degradado desde sua nascente até a foz. Em sua nascente principal, o rio já apresenta pH próximo de 3,0, altas concentrações de sulfatos e de metais pesados.

Recebe contribuições de efluentes industriais (cerâmica, metal-mecânica, vestuários, curtumes etc.), hospitalares, urbanos, além de atividades ligadas à exploração e beneficiamento de carvão mineral. Apresenta grande extensão de áreas degradadas pela deposição de rejeitos, oriundos do beneficiamento de carvão mineral.

Em alguns trechos, o rio Sangão apresenta-se completamente assoreado. No seu baixo curso, em épocas de cheia, extravasa o seu leito normal e invade áreas agricultáveis, deixando um rastro de devastação quando retorna ao seu nível normal, já que toda a área fica recoberta por uma camada de óxido de ferro.

4.3.1 Dados geográficos da sub-bacia do Rio Sangão

Conforme já comentado, a mineração e a agricultura de arroz irrigado não são as únicas atividades econômicas usuárias de recursos hídricos instaladas na bacia. No entanto, o fato de o modelo desenvolvido considerar apenas estas duas permite a desconsideração da localização de todas as outras. Dessa forma, o presente tópico se concentra em estabelecer a

localização de minas de carvão, das usinas de beneficiamento, de depósitos de rejeitos e das áreas de cultivo de arroz irrigado.

Ressalta-se que a utilização de recursos hídricos por parte das demais atividades não consideradas é tratada no modelo com a destinação de um percentual da vazão disponível para outros usos.

A localização dos agentes mencionados foi obtida com apoio do software IDRISI Andes, de imagens do Google Earth e de dados da região.

No software IDRISI foram trabalhadas imagens do satélite LANDSAT-5 e o modelo digital de elevação do terreno. As imagens trabalhadas correspondem às Bandas 3, 4 e 5 de radiação eletromagnética e datam de 04 de fevereiro de 2010. Estão disponíveis na página eletrônica do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) e podem ser obtidas sem custo. De posse dessas imagens, obteve-se a classificação de uso do solo com destaque para áreas de cultivo de arroz irrigado (aparecem como áreas inundadas) e áreas impactadas pela mineração. Salienta-se que as áreas onde se desenvolve lavra subterrânea têm superfície impactada por rejeitos de carvão e, assim, podem ser objeto de classificação. Tais informações foram calibradas com imagens do Google Earth e com o trabalho realizado pelo CETEM, já mencionado no presente estudo.

Para delimitação da bacia do Rio Sangão e para determinação da hidrografia da região utilizou-se o modelo digital de elevação do terreno. Os arquivos referentes ao MDE são disponibilizados pelo Centro de Ecologia da UFRGS (<http://www.ecologia.ufrgs.br/>) e também podem ser obtidos gratuitamente.

As informações sobre localização de minas de carvão, de usinas de beneficiamento de depósitos de rejeitos e de áreas de cultivos de arroz irrigado, bem como a determinação da hidrografia e a delimitação da bacia do Rio Sangão foram objetos de composição de uma única imagem. Foram desconsiderados todos os demais usos do solo. Dessa forma, não constam da composição final a localização de áreas urbanas, de áreas de outros cultivos que não o arroz irrigado, de áreas de vegetação ou pastagens ou de localização de outros agentes econômicos.

A Figura 11 apresenta a composição final obtida. Os depósitos de rejeitos aparecem como áreas preenchidas pela cor vermelha, enquanto as usinas de beneficiamento aparecem

como áreas delimitadas pela cor vermelha. As minas de carvão aparecem na cor preta e as áreas de cultivo de arroz irrigado na cor amarela. Todas as demais áreas da bacia, exceto sua rede hidrográfica, aparecem na cor verde.



Figura 11: Classificação de uso do solo na área drenada pelo Rio Sangão

A fim de diminuir o número de agentes a implantar no modelo e para aproveitar características semelhantes de área, foram executados alguns agrupamentos. Assim sendo, as duas áreas específicas de depósito de rejeitos foram incorporadas aos agentes mineiros mais próximos geograficamente, ou seja, a área DR1 foi considerada integrante da usina de beneficiamento 4 e a área DR2 da usina de beneficiamento 6. A usina de beneficiamento 6, por sua vez, foi considerada junto com 7 uma única usina, já que a área impactada pelas duas se une e que ambas possuem o mesmo ponto de despejo de efluentes no Rio Sangão. Pelo mesmo motivo, as minas 2 e 3 são consideradas um único agente.

Em relação às culturas de arroz irrigado, as áreas 1, 2 e 3 são consideradas no modelo como agente único. A tabela 8 apresenta os agentes e suas áreas de influência.

Tabela 8: Agentes considerados na área drenada pelo Rio Sangão

Agente	Atividade Desenvolvida	Área ocupada (m ²)
Agente 1	Usina de Beneficiamento 1	705.134,0
Agente 2	Usina de Beneficiamento 2	909.457,0
Agente 3	Usina de Beneficiamento 3	280.741,0
Agente 4	Usina 4 e Depósito de Rejeitos 1	447.875,0
Agente 5	Mina subterrânea 1	308.849,0
Agente 6	Usina de Beneficiamento 5	1.045.522,0
Agente 7	Área 1 de cultivo de arroz irrigado	676.140,0
Agente 8	Usinas 6 e 7 e Depósito de Rejeitos 2	884.661,0
Agente 9	Áreas 2, 3 e 4 de cultivo de arroz irrigado	736.405,0
Agente 10	Minas subterrâneas 2 e 3	747.909,0

Destaca-se que foram preservados os nomes das empresas que controlam as áreas acima listadas, bem como os nomes pelos quais as áreas são conhecidas. Ressalta-se, entretanto, que se considerou como usina de beneficiamento todos os locais conhecidos na área como “lavadores” e as minas desativadas que ainda fornecem o serviço de beneficiamento. No modelo, considera-se que os agentes 5 e 10 operam minas onde há lavra subterrânea e beneficiamento do carvão explotado.

4.3.2 Dados hidrometeorológicos da sub-bacia do Rio Sangão

Conforme já mencionado no presente estudo, deve-se dispor dos seguintes dados hidrometeorológicos: vazões nos cursos d’água, precipitação na bacia, padrão de qualidade da água e vazão oriunda de aquíferos subterrâneos. A tabela 9 apresenta a localização dos postos fluviométricos pertencentes à Bacia do Rio Araranguá. Em seguida, a figura 12 mostra a distribuição geográfica desses postos.

Tabela 9: Estações fluviométricas pertencentes à Bacia do Rio Araranguá

Nome da Estação	Local	Latitude	Longitude	Área (Km ²)
Forquilha	Rio Mãe Luzia	28°44’00”	49°28’00”	523,0
Meleiro	Rio Manuel Alves	28°49’00”	49°38’38”	344,0
Foz do Manuel Alves	Rio Manuel Alves	28°52’00”	49°32’32”	404,0
Turvo	Rio Amola Faca	28°56’00”	49°42’42”	336,0
Ermo	Rio Itoupava	28°58’00”	49°38’38”	826,0
Taquaruçu	Rio Itoupava	28°57’00”	49°36’00”	898,0

(Fonte: Adaptada de Santa Catarina, 1997b)

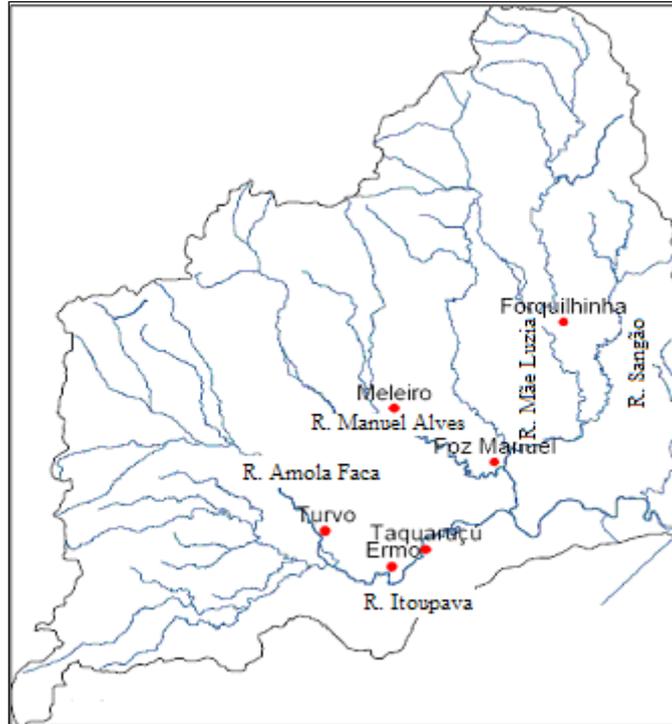


Figura 12: Localização dos postos fluviométricos na Bacia do Rio Araranguá. Fonte: Adaptada de Santa Catarina (1997b).

Dada a semelhança entre as sub-bacias do Rio Araranguá e, especificamente, entre a sub-bacia do Rio Sangão e a área drenada pelo Rio Mãe Luzia até a estação fluviométrica Forquilha, pode-se considerar os dados desta estação como referência para o cálculo da vazão na sub-bacia do Rio Sangão. É necessário, entretanto, estabelecer diferenças de magnitudes devidas à menor área drenada pelo Rio Sangão.

Os dados de vazão das estações fluviométrica descritas estão disponíveis na página eletrônica da ANA. Para fins de análise e de geração de dados aleatórios, pode-se considerar o maior período ininterrupto de dados. Para a estação Forquilha esses dados correspondem ao período de janeiro de 1943 até dezembro de 1966, isto é, 24 anos de dados mensais.

A tabela 10 mostra os dados de vazão média mensal do período citado. Eles estão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas *Hidroweb* no endereço eletrônico seguinte: <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

Tabela 10: Vazões médias mensais na estação Forquilha em m³/s

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1943	4,01	8,97	8,72	3,99	4,27	21,60	7,01	13,30	7,07	10,50	5,83	4,22
1944	40,00	18,00	21,20	10,40	1,50	5,45	3,45	1,80	3,12	1,35	1,60	0,92
1945	0,60	10,80	6,57	1,45	0,56	1,27	1,42	1,65	5,14	5,41	1,83	2,39
1946	12,10	34,20	19,10	1,97	3,77	5,46	15,30	4,16	2,45	5,38	5,44	5,26
1947	5,21	26,90	14,80	4,79	14,00	3,58	6,65	6,48	18,10	15,20	28,40	12,30
1948	15,40	73,70	37,40	29,00	32,20	4,84	5,13	6,70	11,00	2,67	2,90	1,05
1949	13,10	4,11	13,00	9,48	2,39	9,83	11,10	6,20	11,40	15,70	7,24	5,77
1950	6,23	36,60	24,00	14,40	7,60	4,41	2,21	2,99	3,80	14,50	13,80	11,10
1951	30,10	48,70	12,00	13,70	2,65	1,34	1,06	0,48	5,88	18,90	5,39	22,70
1952	16,60	9,26	4,99	2,80	3,83	14,50	8,43	6,22	6,13	17,00	19,40	12,00
1953	4,21	34,10	11,80	10,80	5,97	7,07	6,42	5,13	19,90	17,00	21,90	43,30
1954	16,20	25,20	47,50	58,10	10,20	16,20	33,60	13,40	38,10	27,80	7,45	4,00
1955	7,20	17,20	14,80	20,40	16,00	4,11	10,60	5,74	17,90	4,61	13,20	9,98
1956	34,90	33,10	19,40	21,50	9,53	14,70	4,48	8,14	13,80	25,80	11,20	9,62
1957	18,80	16,70	50,90	41,60	19,30	8,41	16,60	24,70	39,20	41,50	37,70	15,30
1958	31,80	30,90	76,30	9,21	16,80	29,10	4,99	9,24	15,50	16,90	30,50	34,50
1959	24,20	19,50	7,05	5,51	6,47	5,82	3,10	10,20	39,80	14,50	3,25	4,58
1960	9,56	62,10	48,70	12,40	4,09	5,09	5,28	21,20	13,90	15,50	15,70	6,79
1961	10,80	46,70	48,90	26,20	8,14	18,40	23,10	6,17	37,40	20,30	43,90	14,40
1962	24,90	24,50	15,80	7,77	4,38	2,47	16,40	6,28	22,90	7,03	3,08	5,08
1963	30,50	98,00	56,30	11,90	3,48	3,29	9,01	17,00	35,20	39,60	16,40	9,44
1964	4,52	12,90	26,90	16,50	8,60	5,98	9,42	9,01	16,10	21,30	13,50	14,50
1965	8,23	6,80	11,10	10,20	13,80	2,85	3,38	48,10	33,00	10,00	21,70	31,40
1966	40,20	62,80	16,30	41,80	8,07	4,17	6,40	4,18	21,30	15,20	13,30	7,84

Assim sendo, é possível definir as vazões mensais no exutório do Rio Sangão de acordo com a equação 60:

$$Q_{Sang\tilde{a}o} = Q_{Forquilha} * \frac{\mathit{Área}_{Sang\tilde{a}o}}{\mathit{Área}_{Forquilha}} \quad (60)$$

Em consequência, devido à falta de pontos de medição, as vazões nos locais de interesse para o presente estudo são calculadas de acordo com a proporção entre a área drenada pelo ponto de interesse e a área drenada pelo ponto onde se localiza a estação fluviométrica Forquilha, isto é, 523 km². A razão entre as áreas drenadas pelo exutório do Rio Sangão e pelo ponto onde se localiza a estação Forquilha é de 0,415729.

Ressalta-se que o modelo considera as vazões totais mensais, isto é, o volume de água considerado corresponde àquele que flui durante o mês pelo ponto considerado.

Os valores de precipitação adotados referem-se à medição realizada no município de Forquilha, vizinho ao município de Criciúma, onde se localiza parte da sub-bacia do rio Sangão. Os valores de precipitação são utilizados no modelo tanto na parte da mineração quanto na agricultura. Na mineração a precipitação serve para quantificar a carga lançada pelo contato da água pluvial com as superfícies degradadas, onde, de forma geral, encontram-se resíduos da atividade. Na cultura de arroz irrigado, serve para diminuir a necessidade de água alocada para irrigação, tendo em vista que os cultivos recebem menor quantidade de água para irrigação em períodos de maior pluviosidade.

Os dados de vazão da estação pluviométrica de Forquilha estão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas *Hidroweb* na página eletrônica da ANA. Com o mesmo objetivo de análise e de geração de dados aleatórios, considera-se o maior período ininterrupto de dados. Para tal estação, esses dados correspondem ao período de janeiro de 1946 até dezembro de 1966, ou seja, 21 anos de dados mensais. A tabela 11 apresenta os dados de precipitação considerados no modelo.

Tabela 11: Precipitações totais mensais na estação Forquilha em mm

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1943	158.9	190.3	213.1	22.5	55.3	133.4	111.9	86.2	14.8	68.3	46.2	75.5
1944	169.0	261.0	112.4	31.0	156.2	66.2	56.4	57.8	117.8	72.2	141.4	98.6
1945	85.8	212.8	135.0	123.0	188.8	0.0	117.3	58.0	51.5	77.1	60.4	16.6
1946	141.6	54.9	161.6	108.9	20.8	98.4	111.9	53.8	110.8	107.3	30.7	76.3
1947	134.8	286.1	168.4	167.3	57.9	21.4	36.8	38.4	88.4	63.0	105.2	123.7
1948	122.7	226.2	68.4	163.9	8.3	23.2	13.4	0.0	163.2	140.2	105.5	100.4
1949	91.5	83.1	38.9	29.4	59.9	128.4	35.2	81.3	52.3	157.5	113.8	167.7
1950	35.5	105.5	72.5	106.2	88.5	15.5	78.5	65.4	138.2	137.0	99.0	201.9
1951	150.0	253.8	115.1	236.2	52.2	128.4	208.8	71.8	251.2	93.8	66.0	69.9
1952	33.0	156.3	104.4	184.3	101.8	24.2	126.9	81.8	118.7	40.8	100.4	186.4
1953	308.8	159.4	154.9	123.8	64.4	78.6	47.8	91.8	95.7	162.0	41.8	77.7
1954	110.0	106.8	318.6	277.4	80.7	67.8	173.6	167.0	207.4	295.9	186.0	137.9
1955	160.4	210.6	249.4	67.8	111.0	163.4	33.4	119.9	118.2	141.8	141.6	125.2
1956	132.4	87.4	45.4	129.6	82.4	66.4	15.0	120.2	224.4	44.0	25.2	75.2
1957	198.4	146.5	320.2	92.8	31.2	105.6	54.4	204.9	79.4	149.6	86.8	47.2
1958	174.6	118.0	275.1	158.0	60.2	142.4	143.2	47.8	306.2	175.0	289.2	119.2
1959	75.8	112.6	175.6	49.6	55.8	27.6	100.7	38.4	180.4	35.7	49.3	63.2
1960	278.4	218.0	162.4	30.8	25.8	21.2	95.6	198.4	188.0	258.2	163.2	56.4
1961	20.8	201.2	287.0	110.0	23.6	78.0	93.4	83.8	153.4	182.2	92.2	159.6
1962	79.0	55.4	223.2	100.2	113.0	43.4	76.6	537.2	206.2	95.6	136.0	142.8
1963	233.2	344.6	83.6	143.6	11.2	71.0	87.6	92.2	150.0	138.0	26.2	135.6

Por não haver estações pluviométricas localizadas na sub-bacia do Rio Sangão, a precipitação é considerada constante em todos os pontos onde se localizam os agentes.

No presente trabalho, considera-se que a vazão mensal bombeada para fora das minas corresponde ao volume de água oriundo de aquíferos subterrâneos. Segundo o Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD, disponível no Portal da Ação Civil Pública do Carvão na página eletrônica na Justiça Federal da 4ª Região (<https://www.jfsc.jus.br/acpdocarvao/>) – da mina subterrânea localizada ao sul da Bacia do Rio Sangão (Agente 10 do modelo proposto), tal vazão é de 10 m³/h, perfazendo 7200 m³ por mês. Apesar de ser prática comum na região o represamento de águas subterrâneas, considera-se a contaminação e o lançamento de toda a água oriunda do subsolo nos cursos d'água superficiais. O mesmo procedimento é adotado para as águas pluviais.

4.3.3 Geração de dados hidrológicos aleatórios

Os dados de vazão e precipitação apresentados pelas tabelas 10 e 11 são utilizados para a geração de dados sintéticos dentro do horizonte de planejamento do modelo. Dessa forma, o presente tópico apresenta a metodologia utilizada para a geração dos dados sintéticos de precipitação e vazão utilizados no modelo. Salienta-se que a metodologia empregada é fortemente baseada na descrita por Sallas *et al* (1980) para modelos autorregressivos de séries temporais periódicas. A periodicidade adotada no presente estudo é a mensal.

Análise Preliminar

A verificação dos coeficientes de curtose e de assimetria indica que os dados históricos de precipitação e de vazão não se apresentam sob a distribuição normal de probabilidades. Portanto, o primeiro procedimento consiste em realizar uma transformação polinomial. A utilização da raiz quarta dos dados da série histórica mostrou resultados de acordo com a distribuição normal.

A elaboração do correlograma auxilia a análise prévia da série de dados disponível. As figuras 13 e 14 apresentam os respectivos correlogramas de vazão e precipitação com correlação temporal de um (linha azul), dois (linha verde) e três meses (linha vermelha). As linhas horizontais apresentam os valores médios dos resíduos.

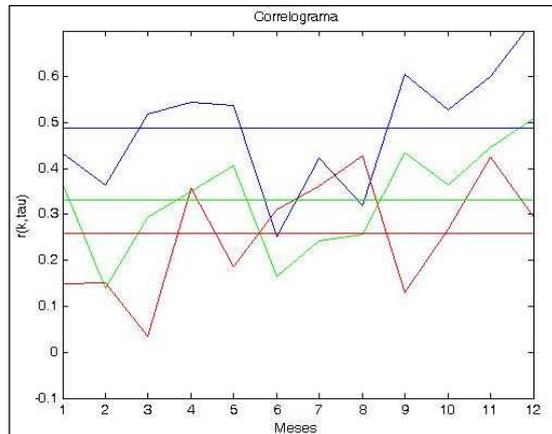


Figura 13: Correlograma da série histórica de vazões

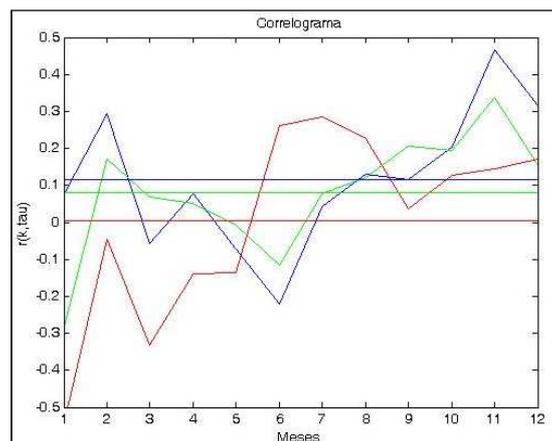


Figura 14: Correlograma da série histórica de precipitações

Considera-se satisfatória a elaboração dos dados sintéticos a partir de um modelo simples autorregressivo com correlação temporal de um mês. A possibilidade de elaboração do modelo com correlação de dois meses também é analisada no presente estudo.

Estimação de Parâmetros

A fim de atender ao princípio da parcimônia de parâmetros, as médias e os desvios mensais são obtidos por séries de Fourier. A equação 61 apresenta a forma de cálculo dos respectivos parâmetros.

$$\hat{v}_\tau = \bar{u} + \sum_{j=1}^h [A_j \cos(2\pi j \tau / w) + B_j \text{sen}(2\pi j \tau / w)], \tau = 1, \dots, w. \quad (61)$$

Na equação 60, a variável v se refere à média ou ao desvio mensal, τ se refere ao mês, w tem o valor correspondente a 12 meses e h se refere ao número de harmônicas utilizado. O número de harmônicas pode ser obtido por meio do Periodograma Cumulativo. Ele apresenta o número de harmônicas necessário para explicar a variabilidade dos dados. As figuras 15 e 16 apresentam o periodograma cumulativo para as séries de vazões e precipitações, respectivamente. As linhas azuis correspondem ao periodograma da média e as vermelhas ao periodograma do desvio padrão.

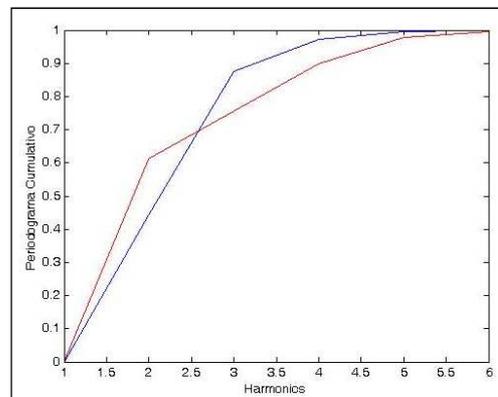


Figura 15: Periodograma cumulativo da série histórica de vazões

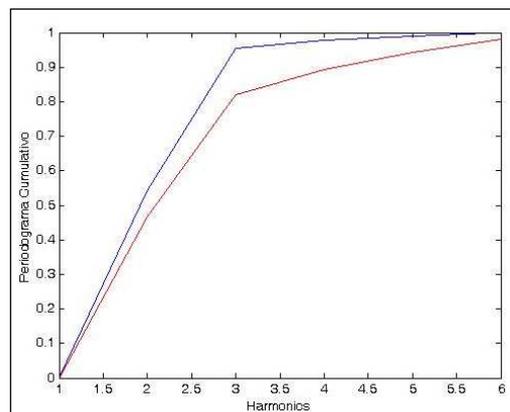


Figura 16: Periodograma cumulativo da série histórica de precipitações

Portanto, conforme figuras 15 e 16, o uso de quatro harmônicas explica mais de 80% da variância de cada parâmetro estimado. As figuras 17 e 18 apresentam as médias e os desvios mensais obtidos por séries de Fourier com quatro harmônicas (linhas azuis), comparando com as médias e os desvios da série histórica (linhas vermelhas).

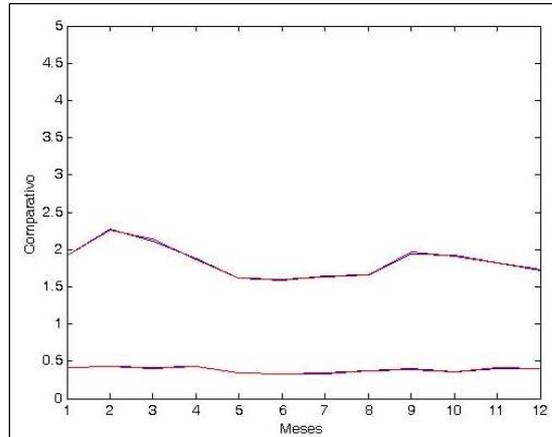


Figura 17: Médias e desvios mensais para a série de vazões

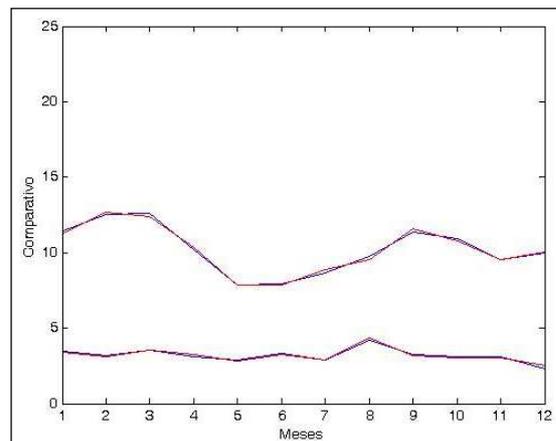


Figura 18: Médias e desvios mensais para a série de precipitações

Verifica-se que os dados obtidos pelas séries de Fourier se sobrepõem aos dados obtidos pela série histórica, validando o procedimento adotado.

As séries históricas de vazões e precipitações são padronizadas utilizando-se as médias e os desvios mensais obtidos pelas respectivas séries de Fourier.

De posse das séries padronizadas e listadas em sequência mensal podem ser obtidos os resíduos do modelo autorregressivo com correlação temporal de um mês, ou seja, modelo AR(1) e AR(2). Os resíduos são obtidos de acordo com a equação 62.

$$\hat{\varepsilon}_t = z_t - \hat{\phi}_1 z_{t-1} - \hat{\phi}_2 z_{t-2}$$

(62)

A série padronizada é representada pela variável z e os coeficientes autorregressivos $\hat{\phi}_1$ e $\hat{\phi}_2$ são obtidos pelas equações 63 e 64, respectivamente.

$$\hat{\phi}_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{1-r_1^2} \quad (63)$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{r_2 - r_1^2}{1-r_1^2} \quad (64)$$

O gráfico do correlograma para os resíduos gerados pela equação 62 também se configura em uma forma de escolha entre os modelos AR(1) e AR(2). As figuras 19 e 20 apresentam os respectivos gráficos. Em tais figuras, as linhas vermelhas e verdes correspondem aos limites dos resíduos com 99% e 95% de confiança, respectivamente. Já as linhas azuis e as linhas pretas respondem aos valores relativos ao modelo AR(1) e AR(2), respectivamente.

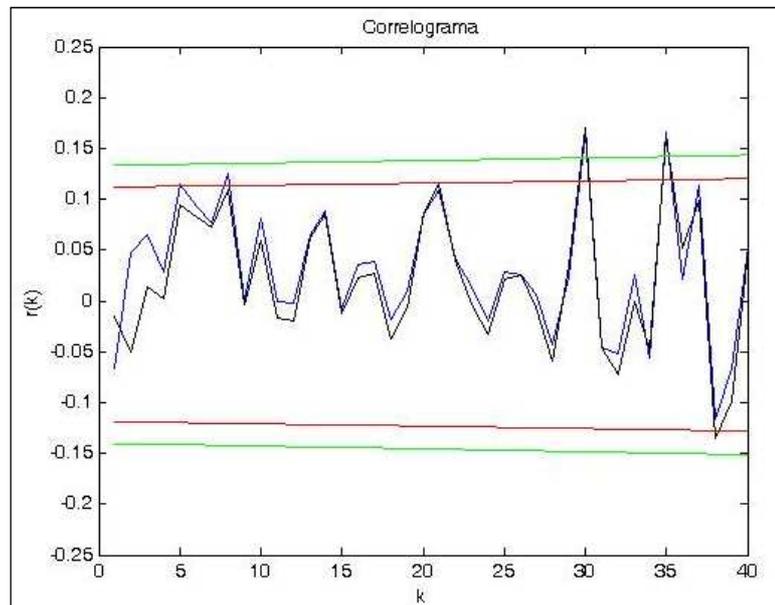


Figura 19: Correlograma residual para a série de vazões

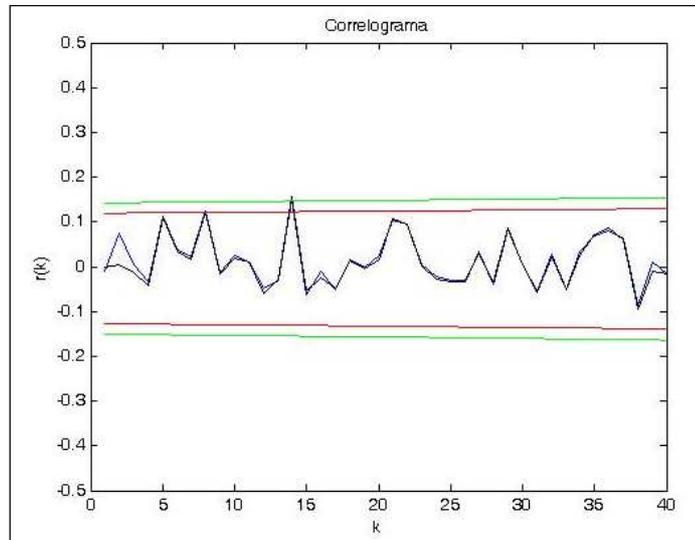


Figura 20: Correlograma residual para a série de precipitações

Em ambos os casos, verifica-se a violação por parte dos modelos AR(1) e AR(2) do limite de confiança de 95% em duas ocasiões ou menos. Considera-se que ambos estariam adequados tendo em vista que o limite foi violado até a margem aceitável de 5% das 40 possibilidades analisadas.

Importa, ainda, o cômputo do erro residual, de acordo com as equações 65, para o modelo AR(1), e 66 para o modelo AR(2).

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = \frac{N \hat{\sigma}^2}{N-1} \left(1 - \hat{\phi}_1^2 \right) \quad (65)$$

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = \frac{N \hat{\sigma}^2 * (1 + \hat{\phi}_2)}{(N-2) * (1 - \hat{\phi}_2)} \left[\left(1 - \hat{\phi}_2 \right)^2 - \hat{\phi}_1^2 \right] \quad (66)$$

Além do fato de terem os resíduos com correlação de um mês menor variação sobre sua média (figuras 13 e 14), a correlação markoviana (baseada apenas na informação do tempo imediatamente anterior) encontra amparo no modelo de Thomas-Fiering (AHMAD *et al*, 2001; SEN, 1978; ÜNAL *et al*, 2004). Portanto, o modelo adotado para a geração de dados aleatórios é o modelo autorregressivo com correlação temporal de um mês, isto é, o modelo AR(1).

Pode-se, então, realizar a geração dos dados aleatórios, de acordo com a equação 67.

$$\hat{y}_{ano,mês} = \hat{\mu}_{mês} + \hat{\sigma}_{mês} z_{ano,mês} \quad (67)$$

A variável z na equação 67 encontra-se distribuída de maneira periódica. Ao tomá-la em sequência única, pode-se realizar seu cálculo considerando a informação contida no tempo anterior e interferências aleatórias. A equação 68 apresenta os cálculos necessários.

$$\hat{z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{z}_{t-1} + \hat{\sigma}_\varepsilon \hat{\xi}_t \quad (68)$$

A aleatoriedade é introduzida pela última parcela da equação 68. A variável ξ é do tipo aleatória, com distribuição normal (média igual a zero e desvio padrão igual a 1) e seu produto com o erro residual representa fenômenos aleatórios que possam vir a interferir nas informações contidas no evento do mês anterior.

Para a série de vazões têm-se: $\hat{\phi}_1=0,5073$ e $\hat{\sigma}_\varepsilon=0,7453$. E para a série de precipitações têm-se: $\hat{\phi}_1=0,1175$ e $\hat{\sigma}_\varepsilon=0,9901$. Após a obtenção dos dados sintéticos, devem os mesmos passar pela transformação inversa daquela que os fez seguir a distribuição normal, isto é, os dados devem ser elevados à quarta potência.

As figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, comparações entre os dados de vazão e precipitação gerados com os últimos 60 meses de cada série histórica. Em ambas as figuras, as linhas azuis correspondem aos dados da série histórica e as linhas vermelhas correspondem aos dados sintéticos gerados pelos respectivos modelos AR(1).

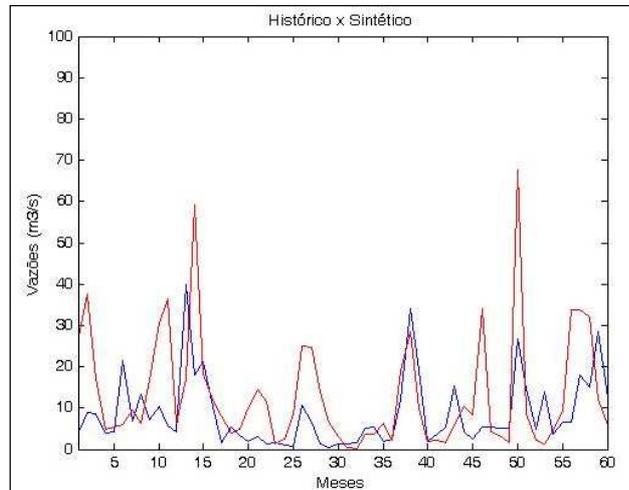


Figura 21: Comparação entre vazões sintéticas e históricas

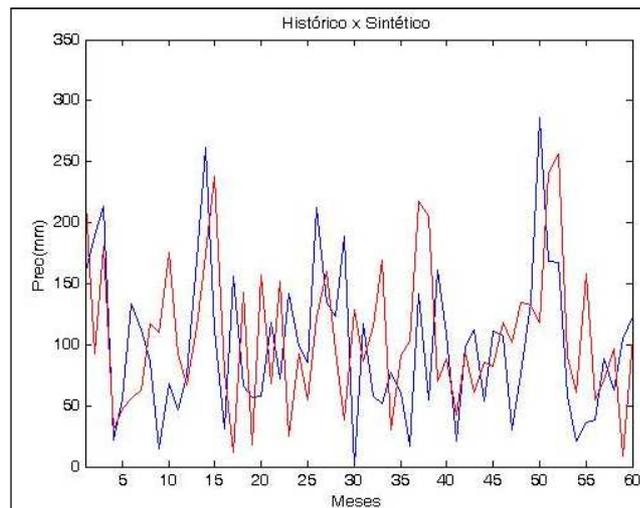


Figura 22: Comparação entre precipitações sintéticas e históricas

Ressalta-se que a geração de dados aleatórios obtida pode ser melhorada. No entanto, como o foco do presente estudo não é a análise de séries temporais, considera-se suficiente o resultado apresentado para a geração de dados aleatórios com dependência temporal.

4.3.4 Condições de qualidade da água

Pode-se dizer que as principais substâncias verificadas na drenagem ácida de mina são: ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre e sulfatos. Gomes (2005) relata a concentração média dos principais componentes da drenagem ácida de treze bocas de minas abandonadas

nas bacias hidrográficas dos Rios Araranguá e Urussanga. A tabela 12 exhibe tais concentrações, além do valor de pH, responsável pela medida de acidez de qualquer solução química, que foi mais frequente na análise da DAM dessas minas.

Tabela 12: Composição da DAM nas minas da bacia do Rio Araranguá

Parâmetro	Padrão
pH	3,17
Fe	29,48 mg/L
Al	18,63 mg/L
Mn	2,63 mg/L
Zn	2,15 mg/L
Cu	0,001 mg/L
Sulfatos	1460 mg/L

(Fonte: Adaptada de Gomes, 2005)

Assim sendo, considera-se que todos os rios da bacia do Rio Sangão possam ser classificados como corpos d'água da classe 1, na qual o padrão de qualidade da água exige maior rigor quanto ao lançamento de efluentes, ou como corpos d'água da classe 3, na qual existe maior tolerância em relação aos parâmetros de qualidade.

Conforme apresentado, os parâmetros de qualidade da água são dados pela Resolução CONAMA 357. De acordo com esta Resolução, para que determinada fonte de água doce seja classificada em dada classe de uso, a concentração de alguns parâmetros não pode ser superior a um limite estabelecido. Os limites de concentração para o enquadramento na classe 1 dos principais parâmetros que compõem a DAM são apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Padrão para corpo d'água classe 1

Parâmetro	Padrão
pH	Entre 6,0 e 9,0
Fe	0,3 mg/L
Al	0,1 mg/L
Mn	0,1 mg/L
Zn	0,18 mg/L
Cu	0,009 mg/L
Sulfatos	250 mg/L

(Fonte: Resolução 357 CONAMA/2005)

Para o enquadramento na classe 3, a Resolução estabelece os limites de concentração dos principais parâmetros que compõem a DAM. Tais limites são apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Padrão para corpo d'água classe 3

Parâmetro	Padrão
pH	Entre 6,0 e 9,0
Fe	5,0 mg/L
Al	0,2 mg/L
Mn	0,5 mg/L
Zn	5,0 mg/L
Cu	0,013 mg/L
Sulfatos	250 mg/L

(Fonte: Resolução 357 CONAMA/2005)

Assim, o tratamento de efluentes deve reduzir a concentração dos parâmetros apresentada na tabela 12 a valores menores ou iguais àqueles apresentados na tabela 13 ou 14, de acordo com cenário apresentado. Para a correta fiscalização, faz-se necessária a adoção de pontos de monitoramento da qualidade da água. No presente estudo, são considerados pontos de monitoramento os trechos de rio onde se consideram os despejos de efluentes ou a captação de água para irrigação do arroz.

4.3.5 Dados relacionados à exploração e ao beneficiamento de carvão mineral

Considera-se que as minas estão situadas no interior da área de rejeitos. Ademais, toda a precipitação incidente sobre essa área e toda a vazão oriunda de aquíferos subterrâneos é considerada formadora de drenagem ácida.

A reserva de minério e o tempo de exploração da mina são fictícios, mas baseados em valores apresentados no estudo desenvolvido pelo CETEM a pedido do SIECESC (CETEM, 2001). O tempo de exploração é de cinco anos para as duas minas consideradas (Agentes 5 e 10).

Os resíduos gerados no beneficiamento são despejados no trecho de rio em cuja área de drenagem a mina se encontra. A verificação do atendimento aos parâmetros de qualidade da água é realizada no mesmo ponto.

Segundo o SIECESC, o preço da tonelada de carvão beneficiado é de R\$ 110,00, considerando-se a produção de CE 4.500 kcal/kg cujo índice de rejeitos é de, aproximadamente, 65%. A taxa de juros considerada é de 0,8% ao mês.

As minas da área de estudo são subterrâneas, fazendo com que as técnicas de exploração possíveis sejam a de câmaras-e-pilares e a de *longwall mining*.

Ainda de acordo com o SIECESC, o custo da lavra subterrânea com a execução de câmaras e pilares é da ordem de R\$30,00 por tonelada ROM, variando de acordo com a escassez. Apesar de a técnica *longwall* não ser utilizada na área do SIECESC, o sindicato estima que seu custo seja da ordem de R\$ 20,00 por tonelada ROM.

Por fim, o beneficiamento do carvão mineral tem um custo aproximado de R\$3,00 por tonelada, conforme informações cedidas pelo SIECESC.

Cumprе ressaltar que os dados apresentados variam de acordo com a empresa mineradora. No entanto, podem ser vistos como uma média apresentada pelas empresas estabelecidas na área de estudo.

4.3.6 Dados relacionados ao tratamento de efluentes

O custo de tratamento de efluentes varia de acordo com a concentração de metais presentes na drenagem ácida. Segundo Gusek (2005), o custo de tratamento por quilograma de metal retirado do efluente, em preços de 1995, pode variar de US\$0,33 a US\$0,38 no caso de tratamento passivo. Para o tratamento ativo, o mesmo autor estima seu custo em, aproximadamente, US\$0,77.

Assim são consideradas três formas diferentes de tratamento. A primeira delas, o tratamento passivo simples, consta apenas de uma bacia de decantação e de uma bacia de fluxo vertical. Outra forma de tratamento passivo, mais eficiente, é semelhante à anterior, porém com o efluente passando ainda por uma lagoa anaeróbica. Por fim, o tratamento ativo considerado consiste da adição de calcário (CaO) em quantidades necessárias à elevação do pH para que os metais sejam precipitados.

Além dessas estruturas, deve-se considerar a existência de estruturas e serviços auxiliares, a saber: condutos, válvulas, coleta de amostras para monitoramento da qualidade da água, emprego de mão-de-obra, manutenção das instalações e remoção do lodo formado.

Os custos de implantação da estrutura de tratamento podem ser divididos em custos de capital e custos anuais. Os primeiros dizem respeito à construção das estruturas onde, de fato, ocorre o tratamento da drenagem ácida. Os custos anuais respondem pelo montante gasto com a operação da estrutura de tratamento. Gusek (2005) faz uma estimativa da razão entre o custo de capital e o custo total de tratamento de efluentes. Em geral, as empresas arcam com os custos de capital em fase anterior ao início das atividades. Conforme apresentado, no modelo todos os custos incidem no agente durante a atividade mineira.

A razão entre o custo de capital e o custo total é mostrada na tabela 15.

Tabela 15: Participação do custo de capital no total gasto com tratamento

Tratamento	Razão: % do custo de capital sobre o custo total
Passivo simples (j=1)	Entre 40% e 60%
Passivo com lagoa anaeróbica (j=2)	Entre 80% e 85%
Ativo com CaO (j=3)	Entre 20% e 30%

(Fonte: Gusek, 2005)

O aumento da participação do custo de capital no total gasto com o tratamento passivo com lagoa anaeróbica em relação ao tratamento passivo simples deve-se à construção de mais uma estrutura, a própria lagoa, a qual necessita de um fundo de calcário, elevando, assim, seu custo de instalação. A menor participação dos custos de capital no total gasto com o tratamento ativo deve-se à necessidade de constante aquisição de reagente, fazendo com que os custos de operação sejam realçados.

A eficiência de qualquer tratamento de efluentes e, em particular, daqueles oriundos das atividades de mineração depende da concentração inicial de substâncias críticas no efluente e do padrão que se deseja alcançar. É comum que se atinja a redução total de contaminantes, embora para tal seja necessário o correto dimensionamento da estrutura de tratamento. Para fins de validação do modelo, é adotado o tratamento ativo como o mais eficiente, isto é, aquele que conduz à remoção total de metais. Ademais, adota-se, para efeito de validação do modelo, que o tratamento passivo simples permite que 2% dos metais

permaneçam no efluente e que o tratamento passivo com lagoa anaeróbica deixa 1% dos metais remanescentes. A tabela 16 relaciona tratamentos, custos e o percentual remanescente de metais.

Tabela 16: Tratamentos, custos e reminiscência de metais.

Tratamento	Custo (R\$/kg)	Percentual Remanescente (η)
Passivo simples	1,42	2%
Passivo com lagoa anaeróbica	1,64	1%
Ativo	3,31	0

Pode-se prever o volume de efluentes a tratar a partir da consideração de que são necessários 2,36 m³ de água para beneficiar uma tonelada de carvão mineral (SANTA CATARINA, 1997a). Soma-se ao volume de efluentes o produto da precipitação total ao longo do tempo da atividade pela área minerada para a determinação do volume de águas pluviais destinadas ao tratamento. A massa total de metais a tratar será o produto da concentração total de metais pelo volume de efluentes gerado.

De acordo com a tabela 12, a concentração total de metais no efluente das minas da sub-bacia do rio Sangão é 52,891 mg/L.

4.3.7 Dados relacionados à cultura de arroz irrigado

Segundo o Instituto Riograndense do Arroz, IRGA (2010), estima-se que o custo de produção do arroz irrigado se encontra em R\$ 660,00 por tonelada produzida, considerando (por hectare) a aplicação de 270 kg de adubo, de 200 kg de uréia em duas fases e 120 kg de sementes, além de 6 litros de glifosato na dessecação. O instituto informa também que o preço da tonelada de arroz é de, aproximadamente, R\$ 1.100,00. Na falta de dados da região de estudo, foram considerados os dados do IRGA no modelo.

A produtividade média das culturas de arroz irrigado situa-se em torno de 6 toneladas por hectare e a demanda hídrica apresenta-se variável com valores entre 8000 m³ e 11513 m³

por hectare. Considera-se que os agentes identificados na região podem variar de 10% a 150% as dimensões da área plantada detectadas na classificação de uso do solo.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os cenários avaliados e seus respectivos resultados. Para isso, entretanto, realiza-se uma breve descrição das variáveis de entrada comuns a todos os cenários e são tecidas algumas considerações a respeito da apresentação dos resultados.

5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO

A tabela 17 recapitula algumas variáveis de entrada gerais, os símbolos adotados, sua classificação e seus respectivos valores.

Tabela 17: Variáveis gerais do modelo

Variável	Símbolo	Classificação	Valor
Tempo de exploração dos recursos	t	Determinística	60 meses
Vazões	Q	Estocástica	Conforme item 4.3.3
Precipitações	P	Estocástica	Conforme item 4.3.3
Taxa anual de inflação	δ	Estocástica	Uniforme [de 8% a 12%]

A tabela 18 apresenta as variáveis relativas à mineração.

Tabela 18: Variáveis de entrada relativas à mineração

Variável	Símbolo	Classificação	Valor
Preço do carvão mineral	p1	Estocástica	Uniforme [de R\$ 100,00 a R\$ 120,00]
Reserva – Agentes 1 e 2	R	Estocástica	Normal [$\mu=800.000$ ton e $\sigma=16.000$ ton]
Reserva – Agentes 3, 4, 6 e 8	R	Estocástica	Normal [$\mu=1.600.000$ ton e $\sigma=32.000$ ton]
Reserva – Agentes 5 e 10	R	Estocástica	Normal [$\mu=3.600.000$ ton e $\sigma=720.000$ ton]
Concentração Fe na DAM	Fe	Estocástica	Uniforme [de 25,0 a 35 mg/L]
Concentração SO ₄ na DAM	SO ₄	Estocástica	Uniforme [de 1400 a 1500 mg/L]
Concentração Mn na DAM	Mn	Estocástica	Uniforme [de 2,8 a 3,2 mg/L]
Custo de Tratamento	CTrat	Determinística	Conforme tabela 16
Percentual remanescente	η	Determinística	Conforme tabela 16
Custo de Exploração	CExp	Determinística	R\$ 30,00/ton
Custo de Beneficiamento	CBen	Determinística	R\$ 3,00/ton
Percentual de rejeitos	ε	Determinística	65%

Considera-se a incerteza da produção das minas maior que aquela verificada no beneficiamento. Por isso, os agentes 5 e 10 possuem desvio padrão de 20% da média e os demais agentes mineiros possuem desvio padrão de apenas 2%.

A dissolução de metais ocorre com a diminuição do pH do efluente. Assim, as concentrações dos metais presentes na DAM estão correlacionadas, de maneira forte, entre si e com a acidez. Tal situação faz com que não seja necessária a verificação e a imposição de limites sobre a concentração de todos os metais. Por isso, a tabela 18 apresenta a consideração de apenas três parâmetros: ferro total, manganês e sulfatos.

Salienta-se que é estipulado um intervalo de produção para cada agente a fim de evitar que se tenha como resultados produção nula em determinados meses. Assim, considera-se que as minas devem produzir no mínimo 20.000 toneladas por mês e no máximo 100.000 toneladas por mês. A produção de cada usina está limitada entre 6.000 e 50.000 toneladas por mês.

A tabela 19 apresenta as variáveis de entrada adotadas para os empreendedores agrícolas.

Tabela 19: Variáveis de entrada relativas à agricultura

Variável	Símbolo	Classificação	Valor
Preço do arroz	p2	Estocástica	Uniforme [de R\$ 1100,00 a R\$ 1200,00]/ton
Custo de produção do arroz	CProd	Determinística	R\$ 660,00 por tonelada
Demanda Hídrica	DemHíd	Estocástica	Uniforme [de 8000 a 11513] m ³ /ha
Produtividade	Prod	Estocástica	Uniforme [de 4,75 a 7,25] ton/ha
Sistema de cultivo	sc	Qualitativa	« pré germinado »

A relação de áreas dada pela equação 59 pode, conforme comentado, ser estendida a todos os agentes instalados na bacia, bastando, para isso, o cálculo da área de drenagem do ponto onde se localizam os despejos de efluentes ou a captação de água para irrigação. Tal cálculo pode ser obtido com auxílio do software IDRISI Andes. Ressalta-se que o modelo adota como pontos de despejo ou captação aqueles pontos no Rio Sangão receptores da drenagem da área de localização do agente. Se o agente se localiza na área de drenagem de algum afluente do Rio Sangão, considera-se a vazão no Rio Sangão no ponto onde tal afluente deságua.

A tabela 20 apresenta a razão entre as áreas de despejos ou captação e a área total drenada pelo exutório do Rio Sangão.

Tabela 20: Relação entre as áreas de drenagem

Agente	Relação Área Agente / Área drenada total
Agente 1	0,027550
Agente 2	0,044749
Agente 3	0,195766
Agente 4	0,195766
Agente 5	0,377454
Agente 6	0,437990
Agente 7	0,450821
Agente 8	0,736162
Agente 9	0,770560
Agente 10	0,856138

A tabela 20 ilustra o fato de que há mais água disponível para os agentes a jusante do que para aqueles a montante da bacia. Em paralelo, os agentes a montante podem usufruir de águas de melhor qualidade e/ou captá-las até o limite da vazão que flui naquele ponto, restringindo usos a jusante. A limitação das alternativas de alocação tem como objetivo reduzir tais disparidades e tratar os agentes de forma igualitária.

Conforme já mencionado, a diferença entre os casos analisados é dada pela variação das formas de tratamento do efluente gerado, pela variação do padrão de qualidade da água desejado e pela variação da vazão disponível para alocação entre mineração e agricultura.

A aleatoriedade é característica fundamental do modelo. Sua função é auxiliar a análise de incertezas e verificar os resultados possíveis, considerando o intervalo de variação assumido para cada variável.

As variáveis relacionadas com as técnicas de manejo de resíduos, os limites de concentração impostos e a presença ou ausência de mina em determinados trechos são consideradas caso a caso.

5.2 FORMATO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Conforme relatado na metodologia, além da maximização da função objetivo, é obtida a produção de cada agente em cada mês do seu período de operação. No entanto, o modelo elaborado também é capaz de apresentar a concentração dos parâmetros analisados (ferro, sulfatos e manganês) durante o mesmo período, tanto na vazão alocada ao agente quanto no ponto de lançamento/captação considerado na bacia.

Dessa forma, apresenta-se o valor da função objetivo e a produção mensal de cada agente, em forma de gráfico. Também são mostradas em forma de gráfico as concentrações dos parâmetros de qualidade da água escolhidos. A partir dos resultados de produção monta-se um fluxo de caixa, representando cada agente e cada setor.

Para o caso base, os cenários de otimização realizados são subdivididos em cinco partes, a saber: apresentação da alocação ótima de recursos hídricos; apresentação do comportamento estocástico do Valor Presente Líquido; apresentação do comportamento da produção dos recursos naturais; apresentação do comportamento da qualidade da água; apresentação do comportamento do fluxo de caixa e análise de sensibilidade. Para os demais casos, são apresentados apenas os resultados que apresentam comportamento diferente daquele mostrado no caso base.

5.3 O CASO BASE: SEM TRATAMENTO DE EFLUENTES

O caso base consiste na situação em que não há qualquer tipo de tratamento para o efluente gerado pelas atividades de mineração e de beneficiamento do carvão mineral. A otimização, neste caso, é realizada com as considerações necessárias a representar a situação vigente durante muito tempo na região e, por isso, também não são considerados os limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357. Por fim, ressalta-se que se considera que toda a vazão da bacia pode ser alocada para as atividades de mineração e rizicultura, desprezando-se quaisquer outros usos.

5.3.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos

Considera-se alocação ótima aquela que foi obtida com mais frequência na rotina de otimização. A tabela 21 apresenta as formas mais frequentes de alocação nas otimizações.

Tabela 21: Alocações de recursos hídricos no caso base

Agente	Alocações		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Usina 1	2%	2%	2%
Usina 2	2%	2%	2%
Usina 3	8%	12%	12%
Usina 4	8%	12%	12%
Mina 5	8%	8%	8%
Usina 6	8%	8%	12%
Arroz irrigado 7	24%	12%	24%
Usina 8	8%	12%	8%
Arroz irrigado 9	24%	24%	12%
Mina 10	8%	8%	8%
FREQUÊNCIA	29,0709%	0,1199%	0,1099%

Conforme mostra a tabela 21, a alocação ótima é aquela em que os agentes agrícolas recebem a maior parcela da vazão disponível. Tal situação encontra explicação na falta de imposição de limites para a concentração dos contaminantes no efluente lançado. Dessa forma, por ser indiferente a quantidade de água alocada para a mineração (tendo em vista que os limites de concentração não serão respeitados), esta é preterida em favor da rizicultura (já que a demanda hídrica é fator limitante à produção de arroz).

Deve-se ressaltar, entretanto, que a falta de qualidade da água onera os agricultores. Estes possuem duas opções: podem tratar a água antes de irrigar os cultivos ou aduzir água de outra bacia. A situação corrente na área de estudo é a escolha da segunda opção. As culturas de arroz são irrigadas por água captada do Rio Mãe Luzia, que, embora também contenha águas contaminadas por DAM, apresenta melhor padrão de qualidade. É inegável que a distância do ponto de captação às áreas irrigadas provocam maiores custos de operação aos empreendedores agrícolas.

5.3.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido

Verificou-se que a função objetivo de maximização da renda total dos agentes instalados na bacia apresenta o valor médio de R\$ 73.554.975,32 com desvio padrão de R\$ 26.791.282,03. A tabela 22 relaciona os agentes instalados na bacia e os valores de média e desvio padrão do VPL de cada um.

Tabela 22: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso base

Agente	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Usina 1	3.819.387,41	1.420.091,24
Usina 2	3.819.508,52	1.423.028,79
Usina 3	7.531.900,71	2.800.213,54
Usina 4	7.525.700,19	2.807.122,32
Mina 5	16.711.048,94	6.949.776,80
Usina 6	7.527.083,03	2.795.655,56
Arroz irrigado 7	1.193.344,28	138.718,09
Usina 8	7.528.344,27	2.795.401,13
Arroz irrigado 9	1.291.138,24	147.028,87
Mina 10	16.607.519,73	6.957.823,61

Pode-se também verificar o Valor Presente Líquido para o agrupamento dos agentes por setor. A tabela 23 apresenta tais resultados.

Tabela 23: VPL – média e desvio padrão por setor no caso base

Setor	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Mineração	71.070.492,80	26.774.702,51
Rizicultura	2.484.482,52	248.959,40
TOTAL	73.554.975,32	26.791.282,03

A variabilidade dos resultados pode ser representada por gráficos que apresentem o VPL obtido em cada simulação e por histogramas. A Figura 23 apresenta o VPL obtido em cada simulação para cada um dos agentes mineiros instalados na bacia.

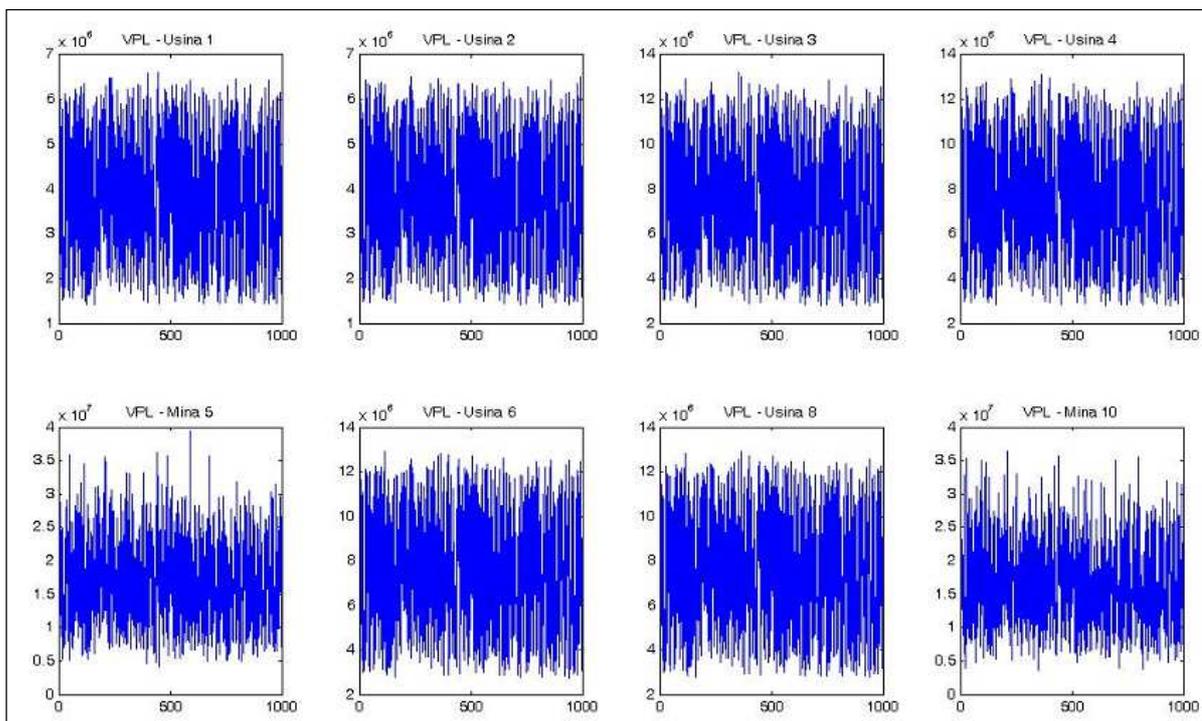


Figura 23: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso base

Na figura 23, importa verificar o intervalo de variação do VPL no eixo das ordenadas. Pode-se constatar que as Usinas de Beneficiamento 1 e 2 variam seus respectivos VPL entre, aproximadamente, R\$ 1,5 milhões e R\$ 6,5 milhões. As Usinas 3, 4, 6 e 8 têm VPL variando entre, aproximadamente, R\$ 2,5 milhões e R\$ 12,5 milhões. Por fim, as Minas 5 e 10 variam o VPL entre R\$ 5 milhões e R\$ 40 milhões, aproximadamente.

A figura 23, no entanto, não permite verificar de forma clara a frequência com que os valores são obtidos. Tal análise pode ser obtida por meio de histogramas. Dessa forma, para cada agente, agrupam-se os VPL obtidos nas simulações em dez intervalos.

A Figura 24 mostra os histogramas dos agentes mineiros instalados na bacia.

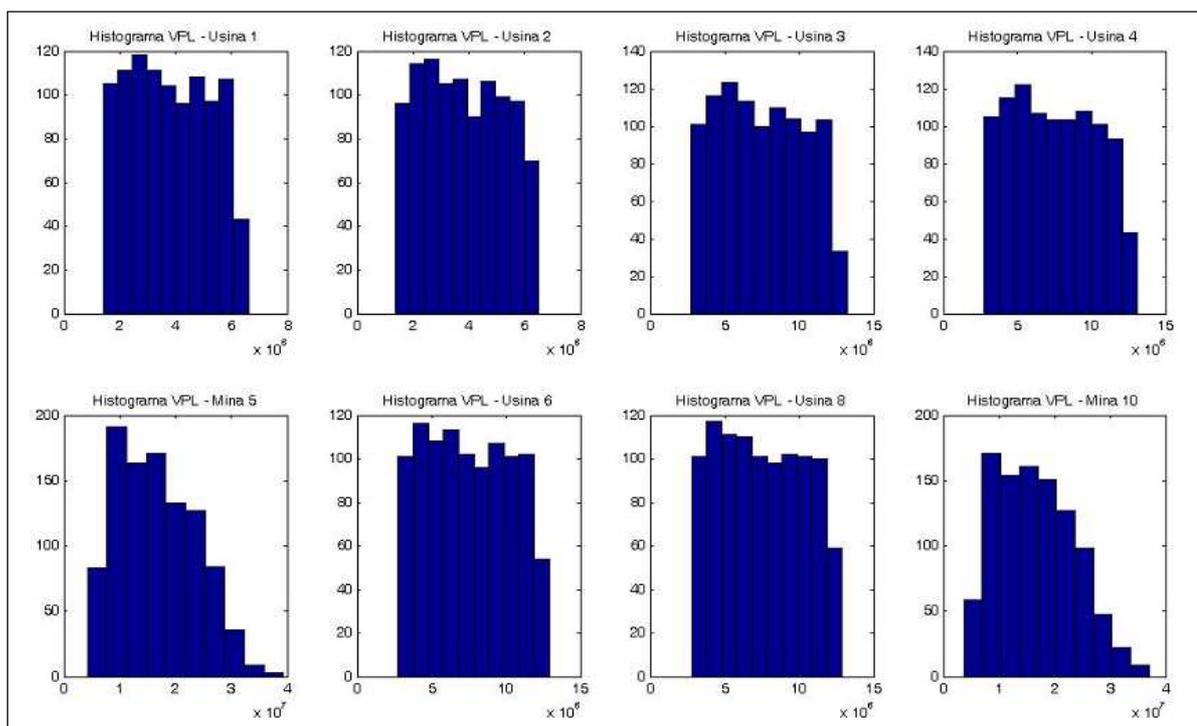


Figura 24: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso base

Percebe-se que, para as usinas de beneficiamento, há certa uniformidade na frequência de cada intervalo de VPL. Em tais agentes (1, 2, 3, 4, 6 e 8), com exceção do intervalo que registra os maiores VPL, os agrupamentos ocorrem de 10% a 12% das vezes.

As minas subterrâneas (agentes 5 e 10) apresentam distribuição assimétrica com intervalo de classe modal à esquerda. Verifica-se que estes agentes apresentam valores menos frequentes no primeiro intervalo e nos quatro últimos. Os demais intervalos ocorrem entre 13% e 18% das vezes aproximadamente.

Em relação aos empreendedores agrícolas, destaca-se a menor geração de renda, dadas as pequenas dimensões das áreas ocupadas com tais atividades. A figura 25 traz o VPL dessas áreas para cada simulação executada.

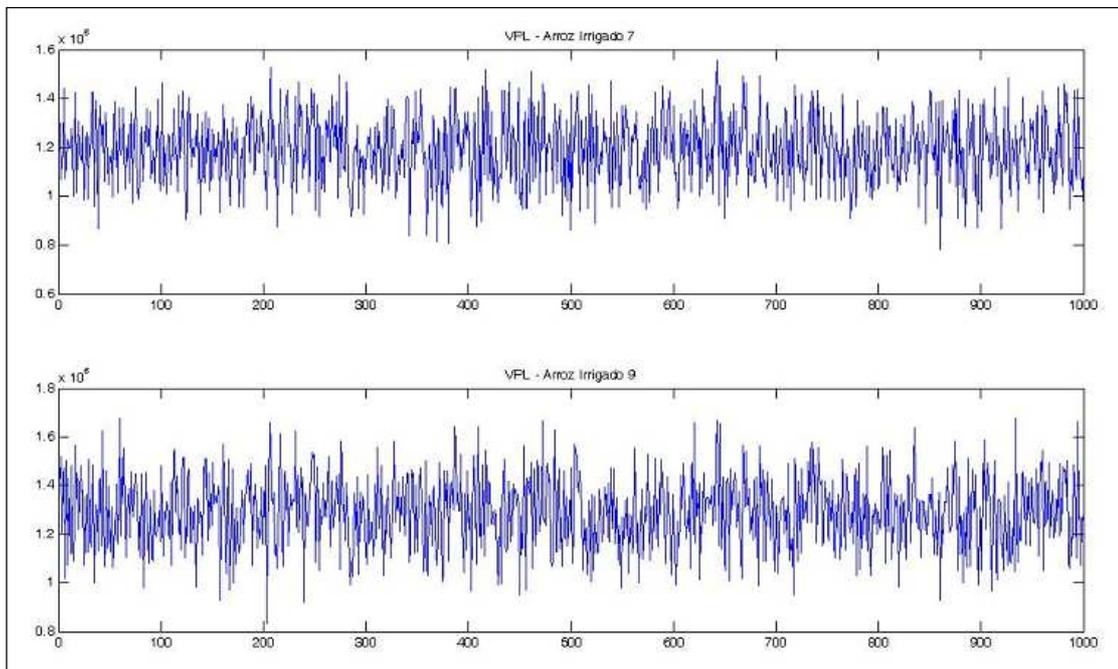


Figura 25: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso base

Verifica-se que o agente 7 apresenta VPL que varia entre, aproximadamente R\$ 850 mil e R\$ 1,4 milhão. O agente 9 varia seu VPL de, aproximadamente R\$ 1 milhão a R\$ 1,6 milhão. Os valores apresentados pelo agente 9 são maiores por causa da maior área por ele ocupada. A figura 26 traz os histogramas dos agentes 7 e 9.

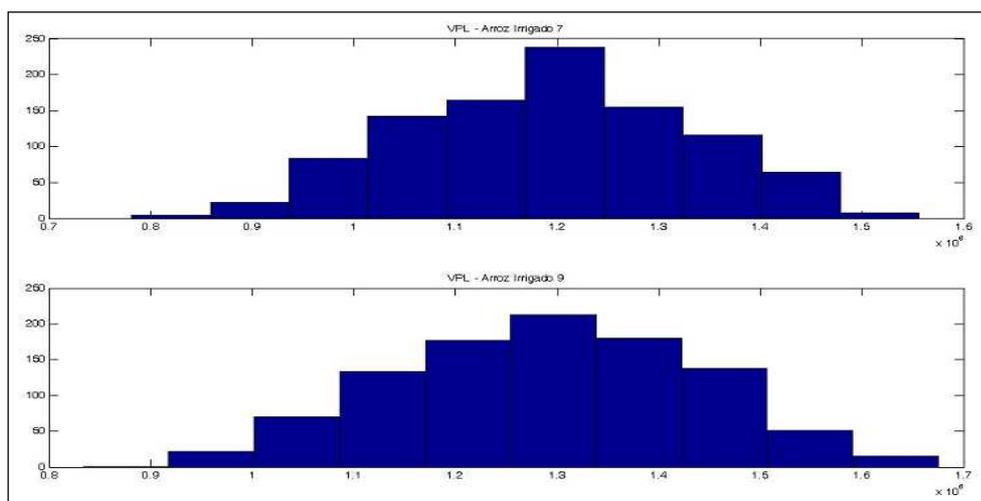


Figura 26: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso base

O histograma dos agentes agrícolas mostra comportamento semelhante à curva de Gauss. Percebe-se a existência de simetria nas suas distribuições de frequência. Portanto, para os agentes agrícolas, pode-se admitir que os valores médios são aqueles que ocorrem com maior frequência nas simulações – mais de 20% das ocorrências em cada agente agrícola.

A avaliação da variabilidade de geração de receitas por setor também é interessante. Ela consiste na soma do VPL obtido pelos agentes representados por minas de carvão e usinas de beneficiamento e na soma do VPL obtido pelas áreas de cultivo de arroz irrigado. Por sua vez, a variabilidade do VPL total na bacia é obtida pela soma dos valores obtidos em cada setor. A Figura 27 apresenta a variabilidade do VPL por setor e o total da bacia.

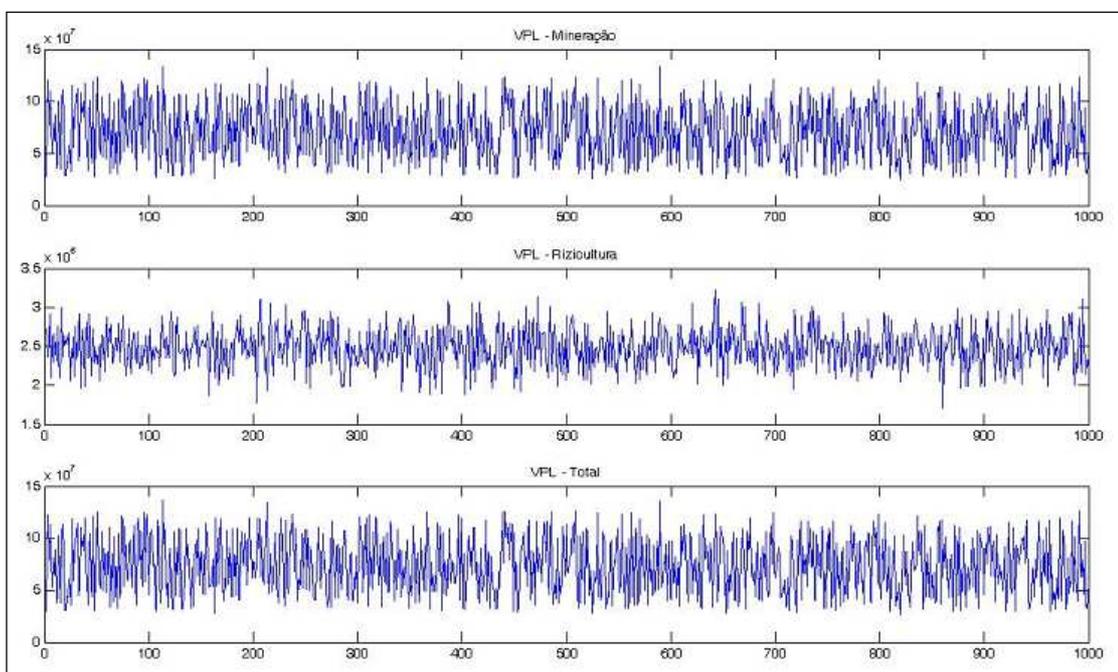


Figura 27: Comportamento do VPL por setor.

Os histogramas do VPL de cada setor, bem como do VPL total da bacia, são um reflexo do que foi apresentado. O comportamento gaussiano do VPL da rizicultura pouco influencia o VPL total da bacia, dado que seus valores se situam uma ordem de grandeza abaixo daqueles obtidos pela mineração.

A figura 28 apresenta os histogramas do VPL por setor e o total da bacia.

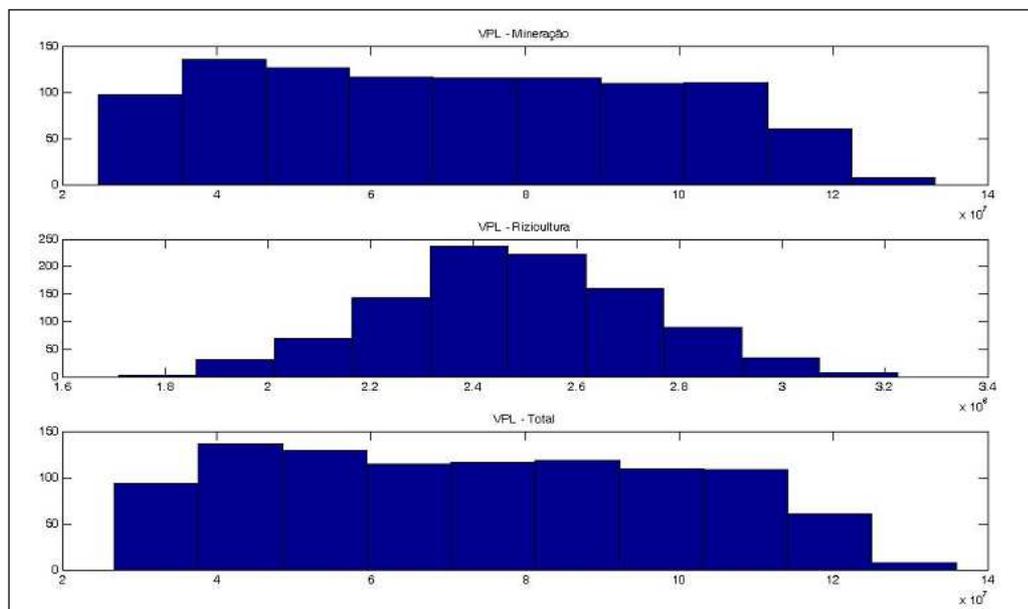


Figura 28: Histograma dos VPL por setor no caso base

Portanto, o agente regulador da bacia poderia esperar um comportamento gaussiano para os valores gerados pelos empreendedores agrícolas e um comportamento uniforme (excetuando os dois grupos de maiores valores) para o VPL da mineração e para o total da bacia. Em outras palavras, acredita-se que a ausência de tratamento e de imposição de limites de concentração de contaminantes confere à renda gerada na bacia probabilidades aproximadamente iguais de ocorrência, se desconsiderados os dois grupos de maiores valores.

5.3.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais

A produção de recursos naturais a ser apresentada no presente tópico consiste na média aritmética entre as produções mensais obtidas em cada uma das 1000 simulações. Ainda assim, tal comportamento deve ser visto de maneira separada. A produção dos recursos naturais não renováveis tem desempenho diferente daquela que envolve recursos renováveis.

A principal diferença consiste na existência da reserva de recursos. O carvão mineral é produzido a partir de uma reserva conhecida, da qual existe reduzido grau de incerteza, enquanto a produção de arroz é influenciada por diversas variáveis aleatórias, tais como:

disponibilidade e demanda hídrica e produtividade a ser alcançada com o uso de defensivos agrícolas, fertilizantes e, até mesmo, com o manejo do solo.

Além disso, a taxa de juros utilizada para trazer a renda gerada a valor presente faz com que seja mais interessante para as mineradoras trabalhar no limite máximo de sua capacidade nos meses iniciais, deixando que o limite mínimo de produção vigore nos meses finais até o esgotamento da reserva ou até que se atinja o objetivo de produção planejado. O fato ocorre pela desconsideração da variação da demanda no horizonte de planejamento.

A figura 29 apresenta o comportamento da produção de carvão mineral pelas minas e pelas usinas de beneficiamento ao longo do horizonte de 60 meses de planejamento.

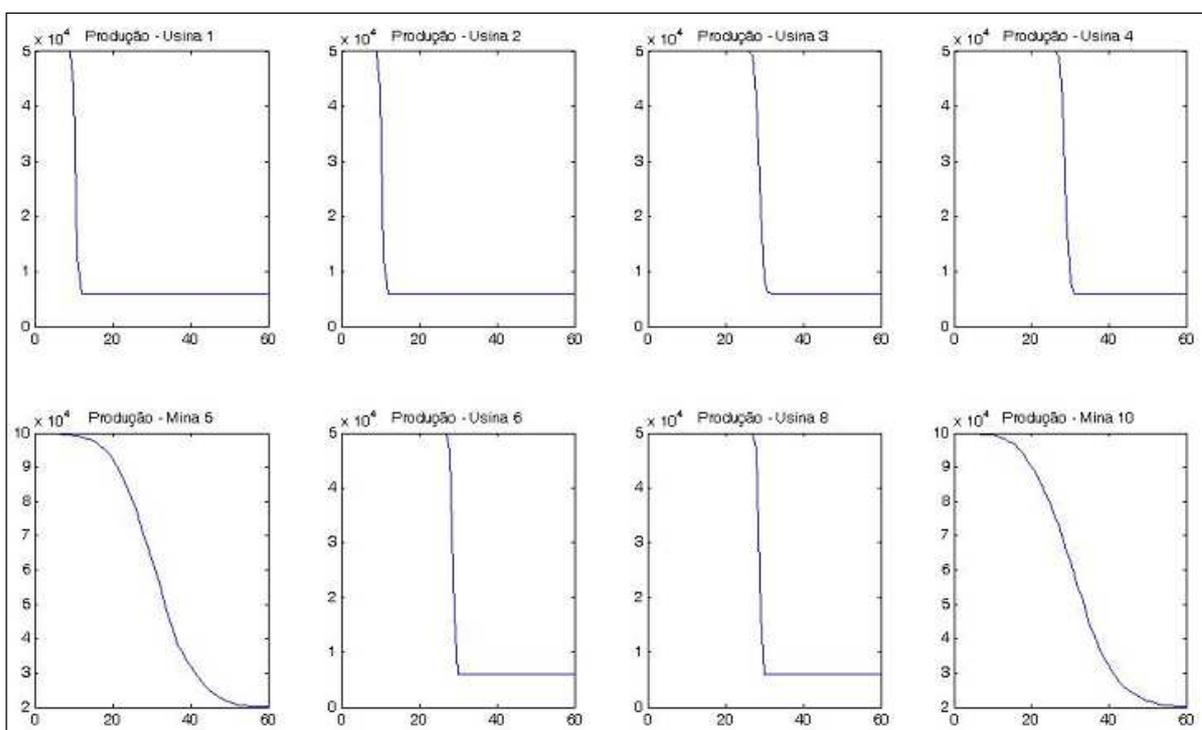


Figura 29: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso base

Pode-se perceber que as usinas de beneficiamento apresentam uma mudança abrupta da produção máxima para a produção mínima e que o mesmo não acontece nas minas de lavra subterrânea. Tal se deve à menor produção planejada para as usinas e, em consequência à menor incerteza absoluta a ela associada e à menor dispersão considerada para seus dados. Em paralelo, a maior incerteza associada às minas subterrâneas leva a um declínio da produção em períodos diferentes, diminuindo a média mensal. Assim sendo, a transição da produção máxima para a produção mínima ocorre, nesses agentes, de modo mais suave.

Em relação à rizicultura, destaca-se que foi considerado um ciclo de produção anual. Portanto, a produção apresentada no gráfico se refere ao total após um ciclo de colheita.

A figura 30 apresenta a evolução da produção de arroz no período considerado.

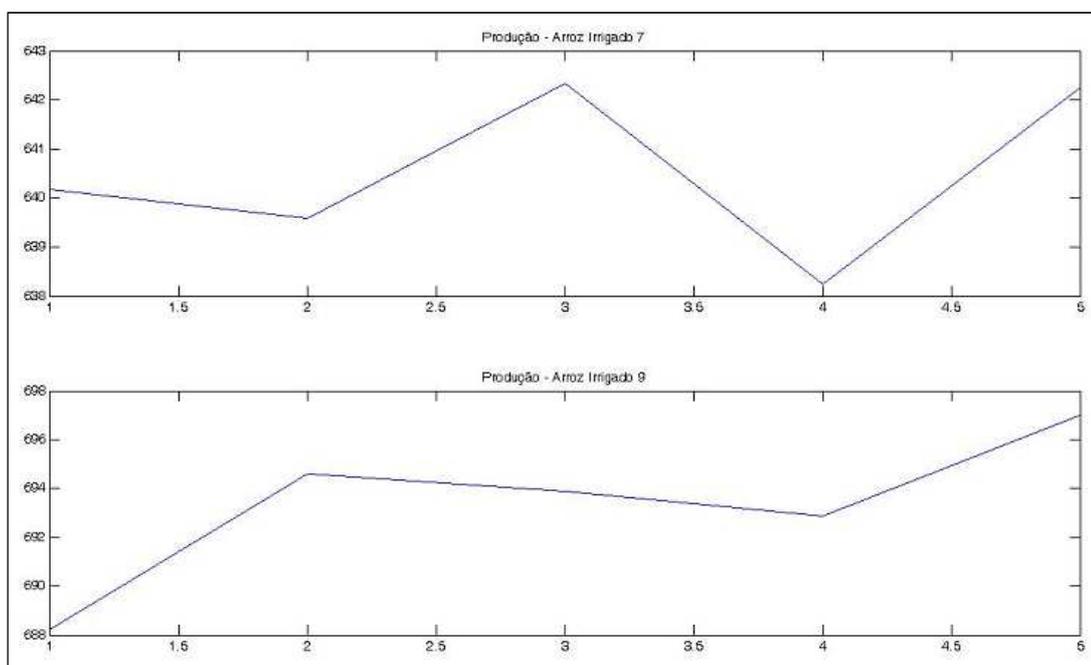


Figura 30: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso base

Importante verificar que a diferença entre a produção máxima e a produção mínima se situa próxima a 0,5% para os dois agentes agrícolas, apesar das aleatoriedades consideradas em cada ciclo de cultura.

5.3.4 Comportamento da Qualidade da Água

A produção e o beneficiamento de carvão mineral são responsáveis pela geração de drenagem ácida de mina e de efluente ácido, respectivamente. Por sua vez, captação de água para irrigação de cultivos diminui a capacidade da bacia de dissolver os contaminantes nela lançados. Como resultado dessa associação de fatores prejudiciais à qualidade da água tem-se o desrespeito aos limites preconizados pela Resolução CONAMA 357 e, em consequência, águas superficiais inservíveis para aproveitamento de qualquer natureza.

Dessa forma, são apresentados gráficos da concentração dos contaminantes considerados (ferro, sulfatos e manganês) durante o período de exploração considerado. Cabe ressaltar que a concentração do contaminante é obtida a partir da produção média de minério de cada mês (conforme apresentado no tópico que se refere ao comportamento da produção).

O padrão de qualidade da água é visto de duas maneiras. A primeira delas diz respeito à concentração dos contaminantes na água alocada para o agente. Tal concentração não leva em conta a contribuição dos outros agentes e, nem mesmo, a quantidade de água que flui no ponto de despejo dos efluentes. É obtida pelo quociente entre a geração de resíduos de cada agente e a quantidade de água alocada.

A figura 31 apresenta o comportamento da concentração de ferro na água alocada para cada um dos agentes mineiros.

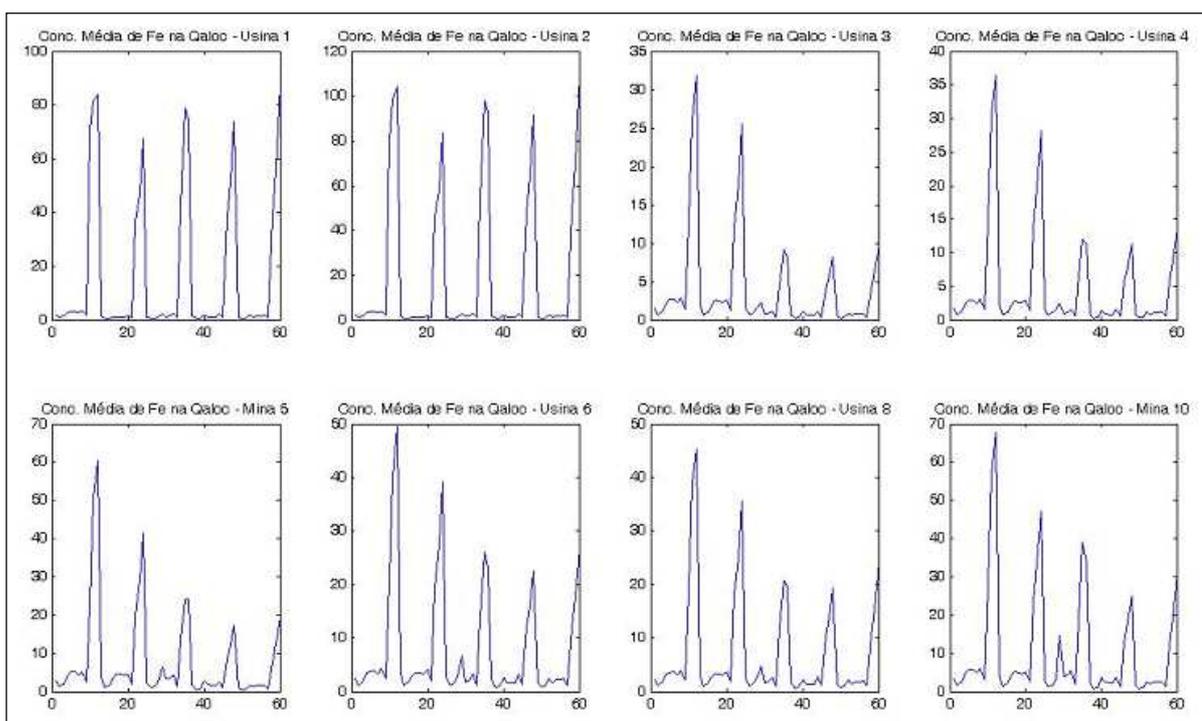


Figura 31: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso base

Os demais contaminantes apresentam comportamento semelhante, com distinção dada para os níveis de concentração atingidos por cada um, já que eles diferem entre si na parcela de composição do efluente gerado. A Figura 32 apresenta a concentração média de sulfatos.

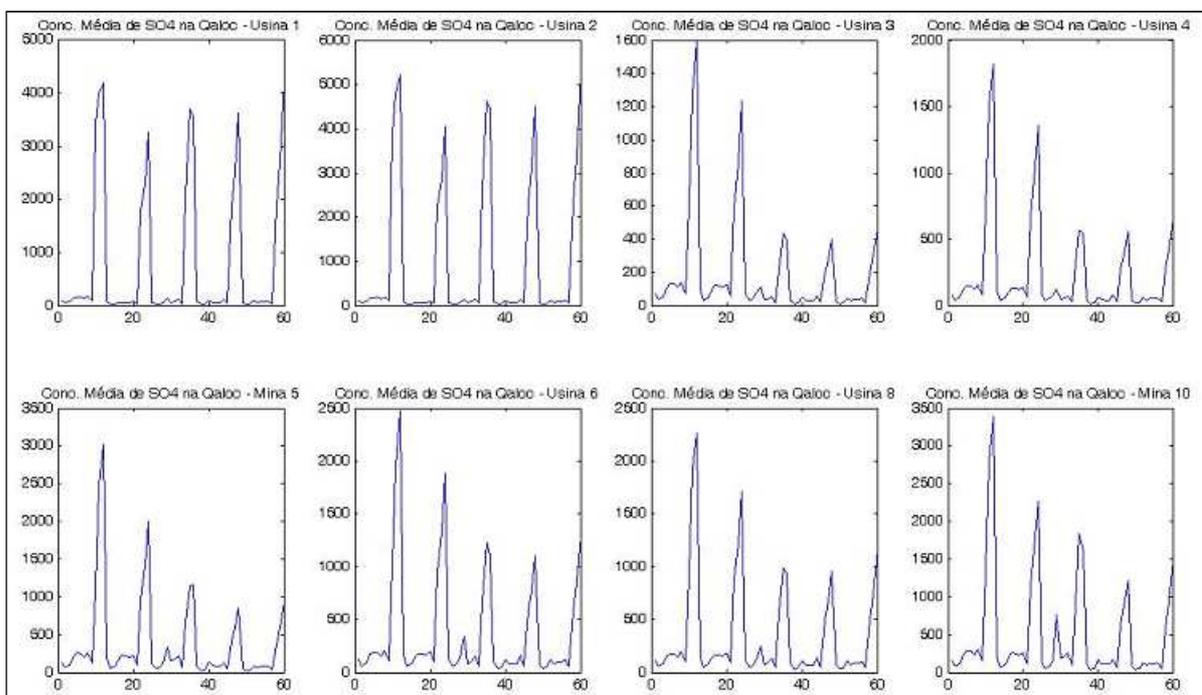


Figura 32: Conc. média de SO_4 na água alocada para os agentes mineiros no caso base

A concentração de manganês comporta-se no tempo conforme figura 33.

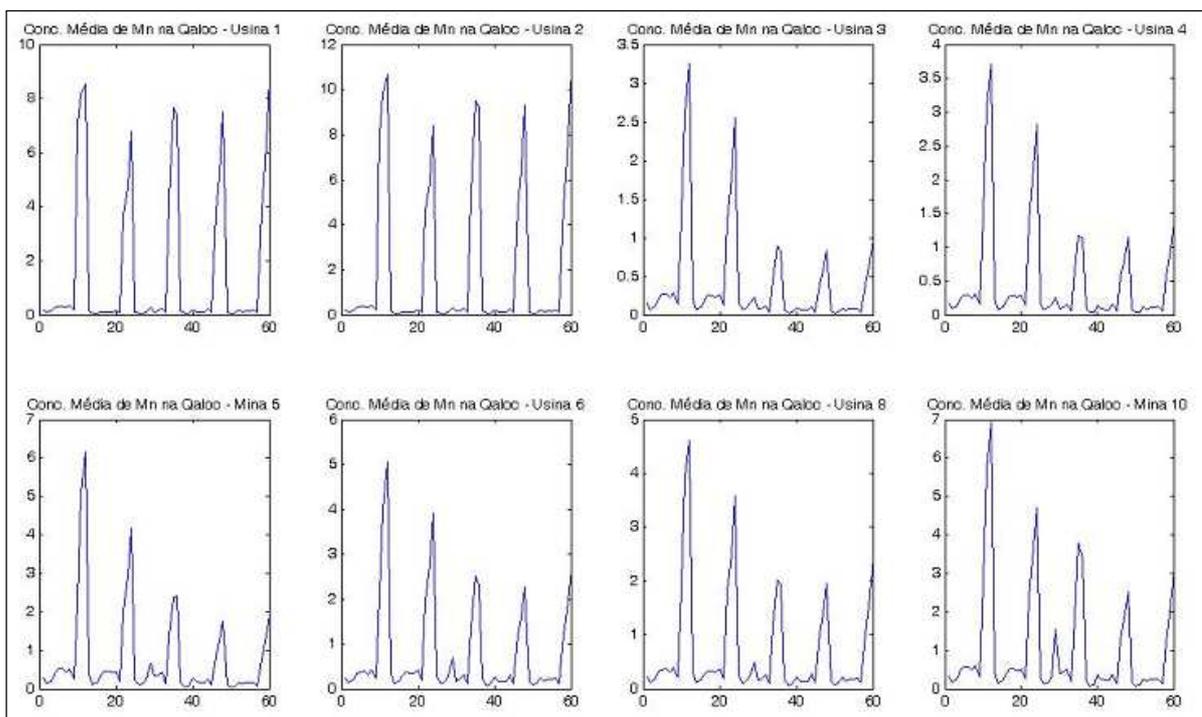


Figura 33: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso base

Em todos os três contaminantes considerados, pode-se perceber a existência de picos de concentração elevada nos meses em que há captação de água para irrigação de arroz. Tal fato se deve à redução da quantidade de água alocada para os agentes mineiros.

A concentração de contaminantes na vazão alocada pode ser superior àquela permitida pela legislação, desde que haja maior vazão fluindo no ponto de despejo dos efluentes. Em paralelo, a contribuição de agentes instalados a montante (seja pelo lançamento de contaminantes, seja pela captação de água) influi de forma adversa no padrão de qualidade da água da bacia. Dessa maneira, é interessante verificar a concentração dos contaminantes em questão, considerando a vazão existente no ponto de lançamento dos efluentes.

A figura 34 apresenta a concentração de ferro nos pontos de monitoramento do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

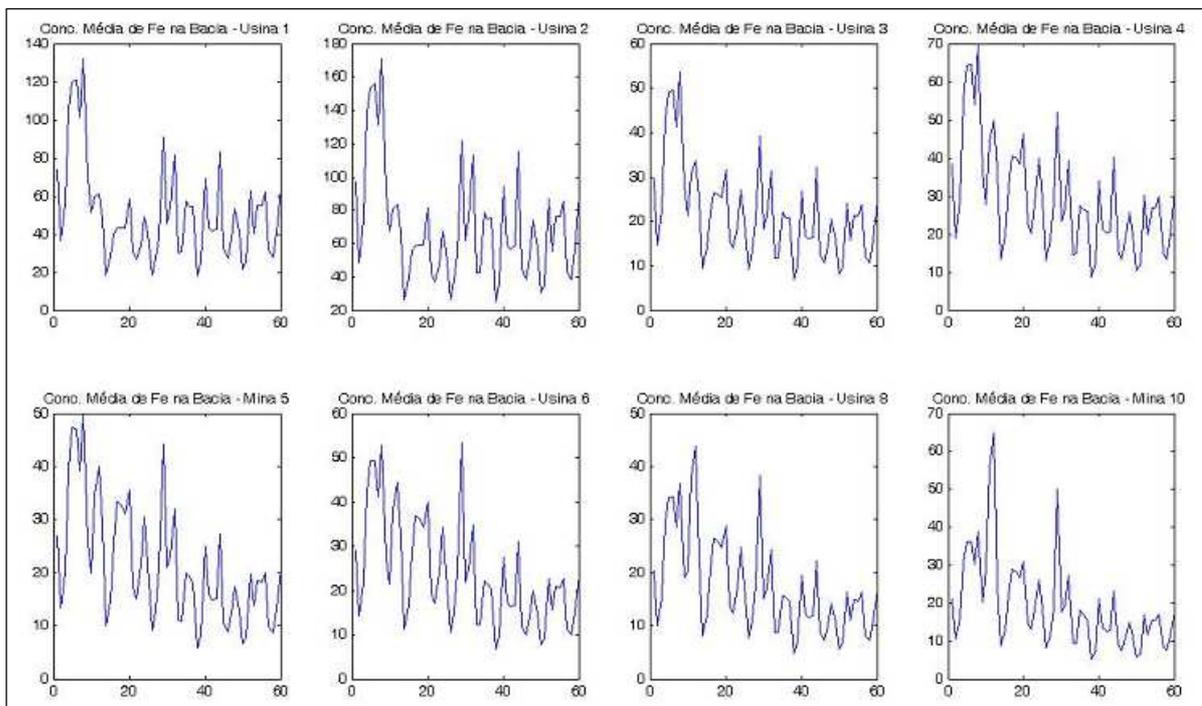


Figura 34: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base

Verifica-se que durante todo o período considerado a concentração de contaminantes nos pontos de monitoramento se situa acima do que a Resolução CONAMA 357 permite, tanto para enquadramento na Classe 1 quanto na Classe 3.

Enfatizando que a falta de tratamento impede a observação de águas superficiais com padrões de qualidade em níveis aceitáveis, a figura 35 mostra a concentração de ferro nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

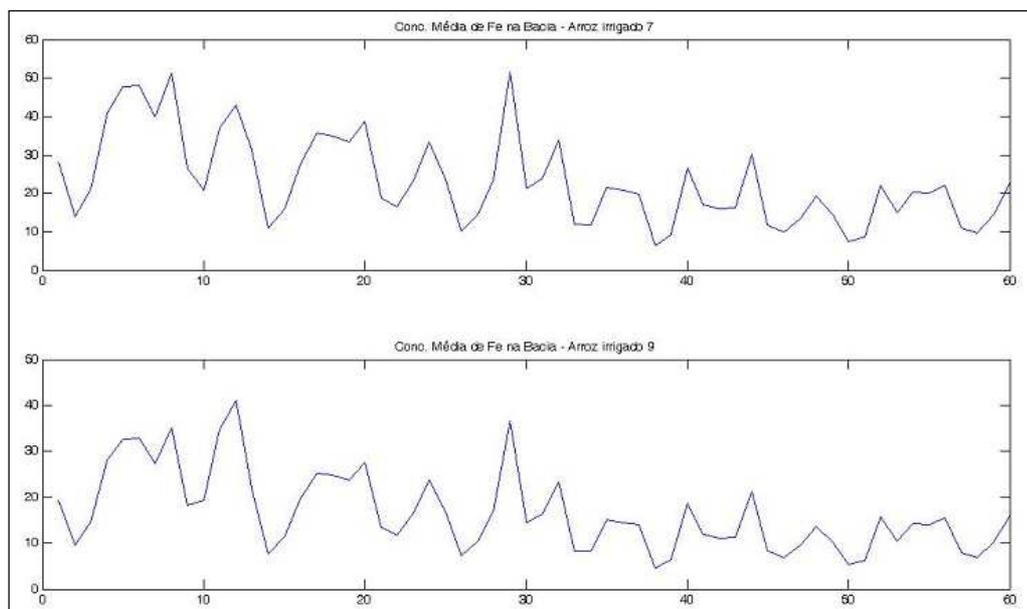


Figura 35: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso base

Dessa forma, constata-se que, sem o tratamento de efluentes das atividades de mineração, a água para irrigação não dispõe de padrões aceitáveis de qualidade para tal fim.

Os demais contaminantes considerados no presente estudo apresentam comportamento semelhante. No entanto, a concentração atingida por cada um depende da respectiva quantidade na composição do efluente. Assim, apesar da semelhança gráfica, o eixo das ordenadas apresenta valores diferentes. A figura 36 apresenta a concentração de sulfatos nos pontos de monitoramento do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

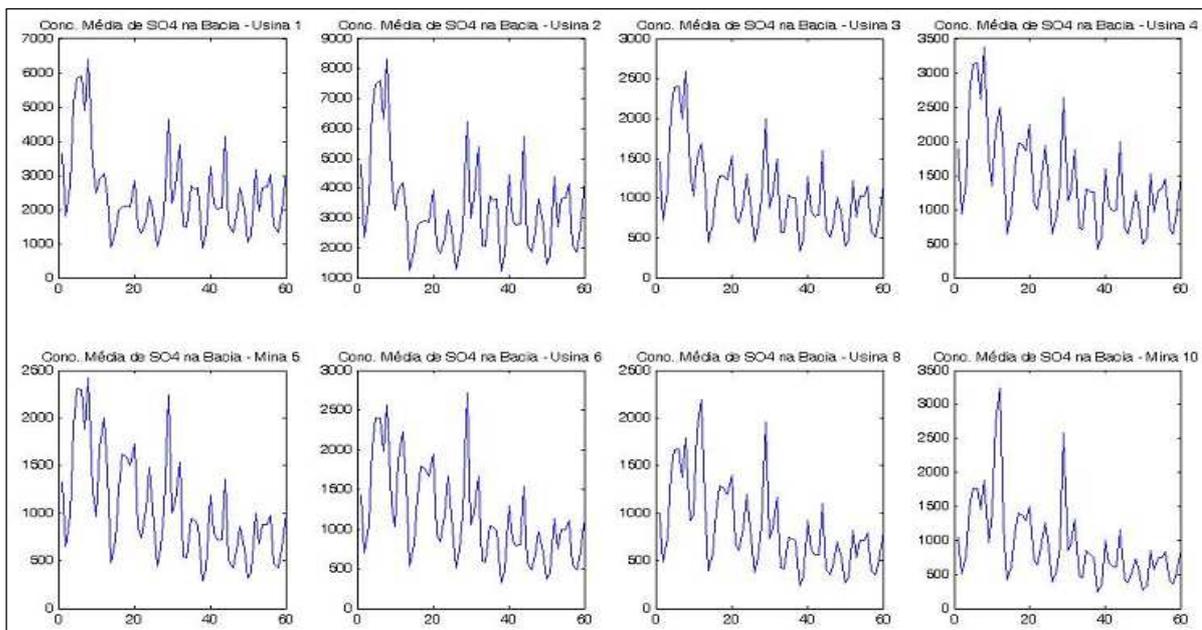


Figura 36: Conc. média de SO_4 nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base

A figura 37 mostra a concentração de sulfatos nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

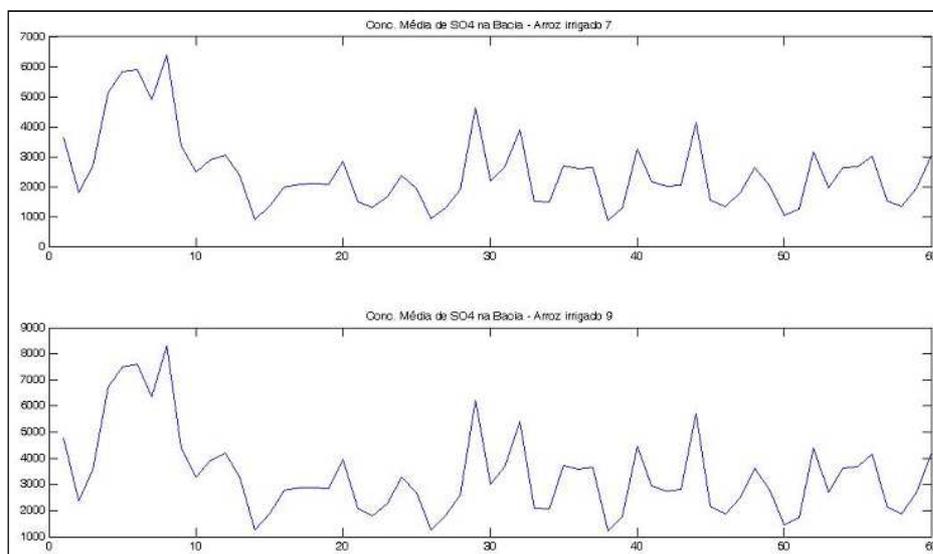


Figura 37: Conc. média de SO_4 nos pontos de captação para irrigação no caso base

A figura 38 apresenta a concentração de manganês nos pontos de monitoramento do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

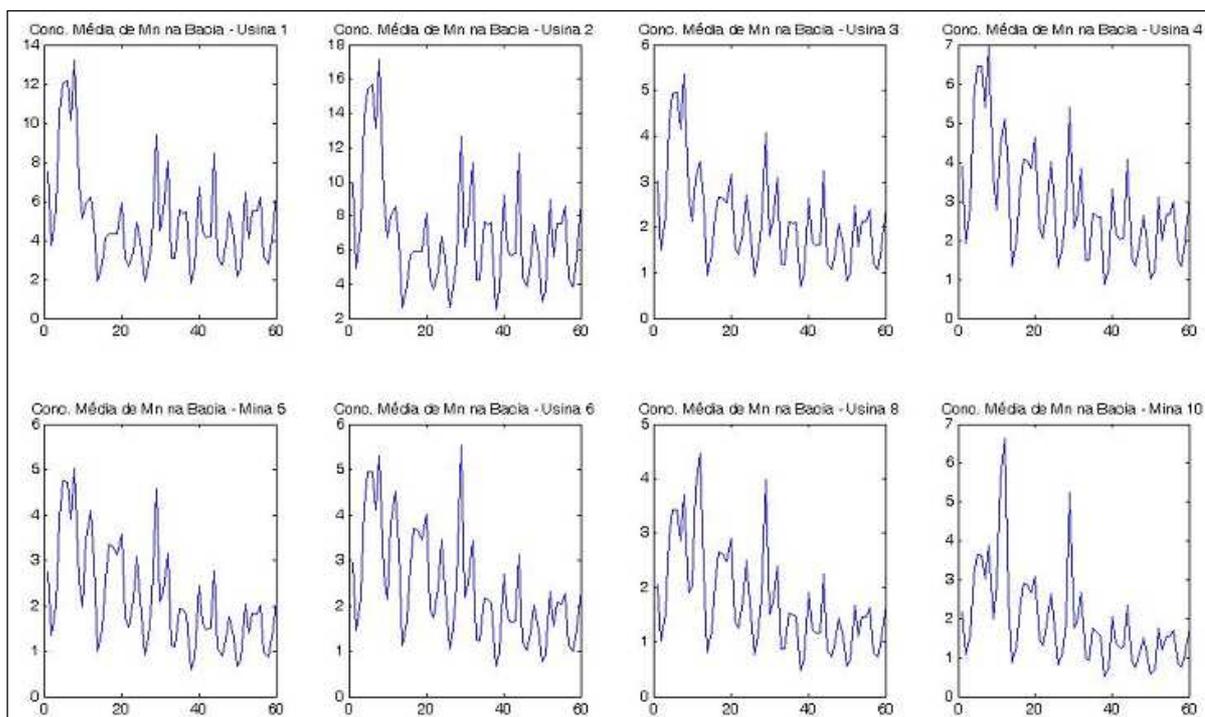


Figura 38: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso base

A figura 39 mostra a concentração de manganês nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

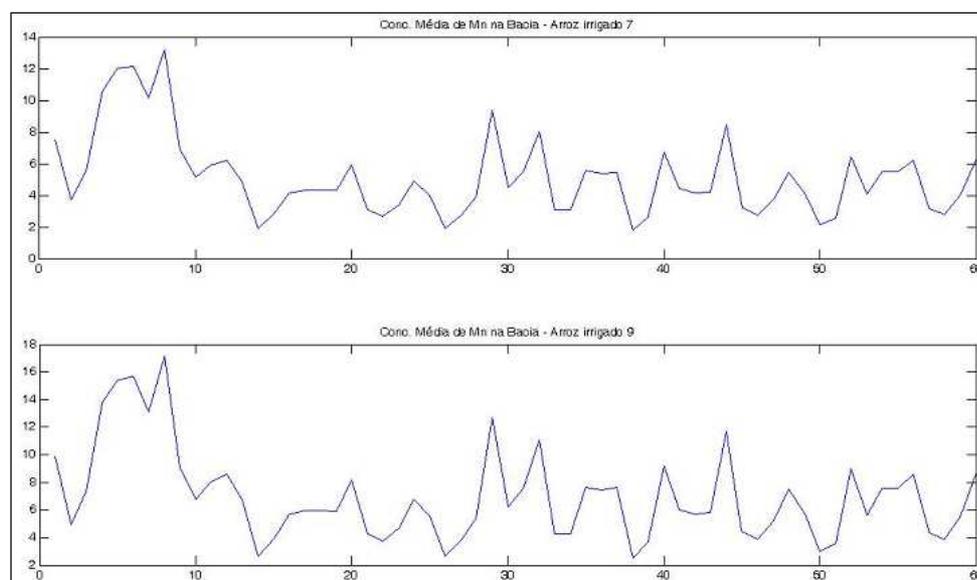


Figura 39: Conc. média de Mn nos pontos de captação para irrigação no caso base

Por fim, importa verificar como a concentração dos contaminantes considerados se comporta no exutório da bacia. Tal análise permite observar como as atividades localizadas na área de estudo poderiam influenciar o padrão de qualidade da água a jusante.

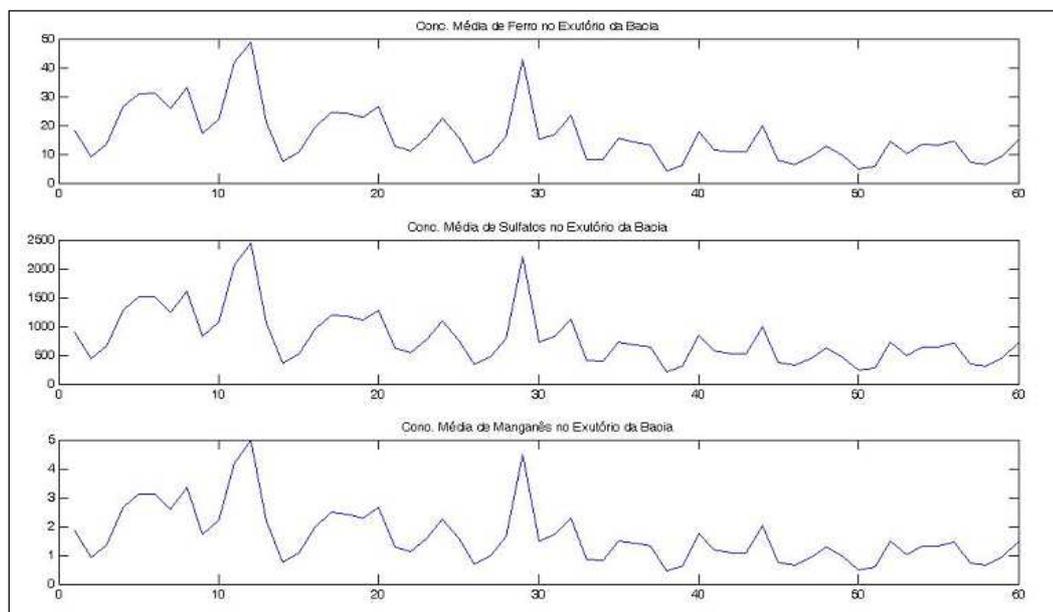


Figura 40: Conc. média de contaminantes no exutório da bacia no caso base

Constata-se que os limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357 não são respeitados, nem mesmo, no exutório da bacia de estudo. Tais limites, no caso do ferro, são violados em picos com concentração superior a dez vezes o permitido para a Classe 3 e aproximadamente 166 vezes o que se permite para a Classe 1. Os demais contaminantes apresentam violações de magnitudes semelhantes.

5.3.5 Comportamento do Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa tanto dos agentes mineiros quanto dos agentes agrícolas se comporta de forma semelhante à produção dos respectivos recursos naturais. Em outras palavras, as curvas mostradas pelo comportamento do fluxo de caixa seguem padrões semelhantes às aquelas mostradas pelas curvas de produção.

A figura 41 apresenta o fluxo de caixa dos agentes mineiros.

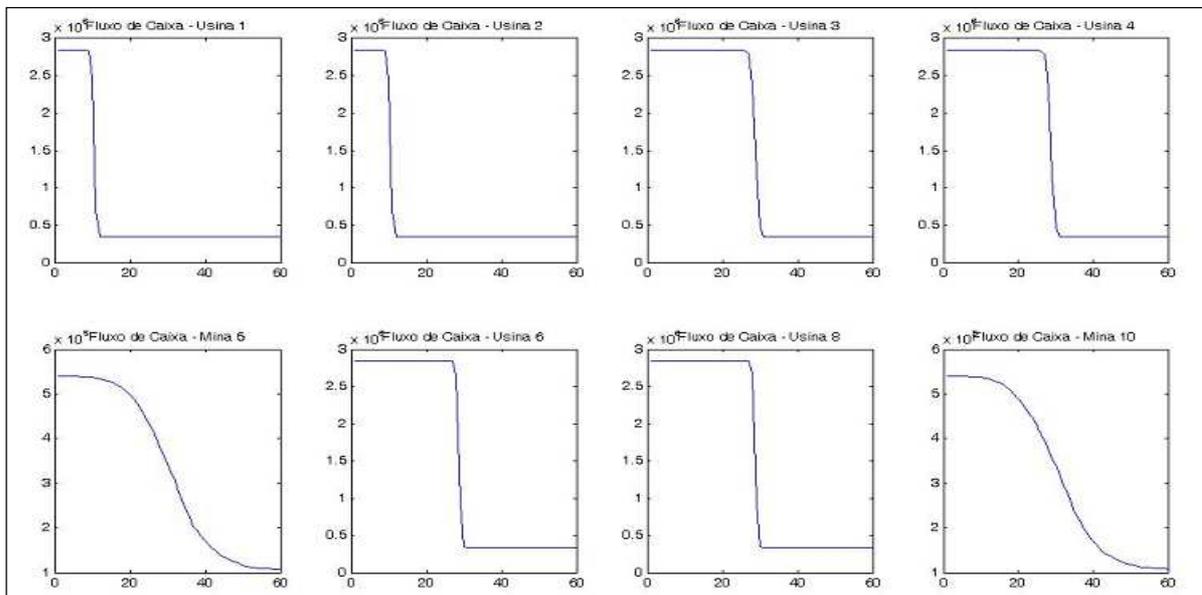


Figura 41: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso base

A figura 42 apresenta o fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.

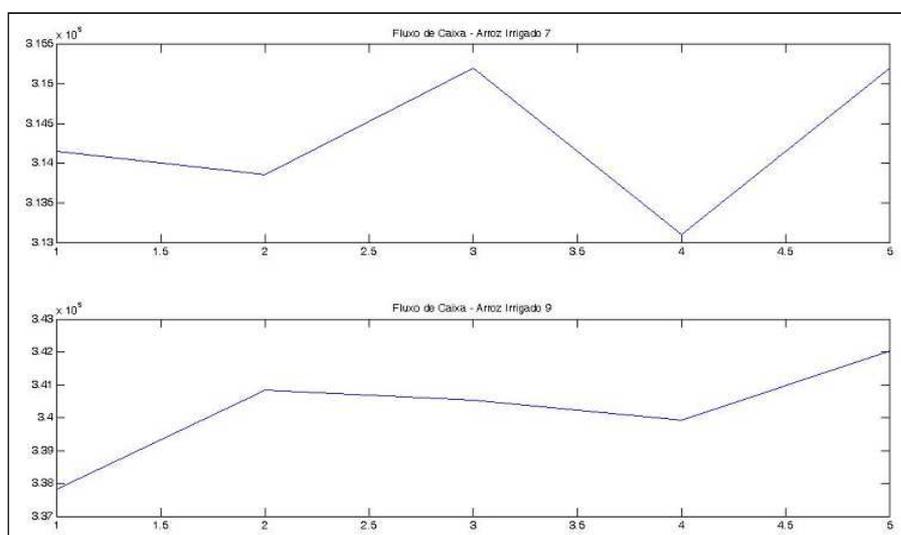


Figura 42: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso base

O padrão semelhante entre a produção dos recursos naturais e o fluxo de caixa tem explicação no fato de terem sido consideradas funções lineares tanto para receita bruta quanto para os gastos de ambas as categorias de agentes.

A figura 43 apresenta o fluxo de caixa dos setores de mineração e de agricultura.

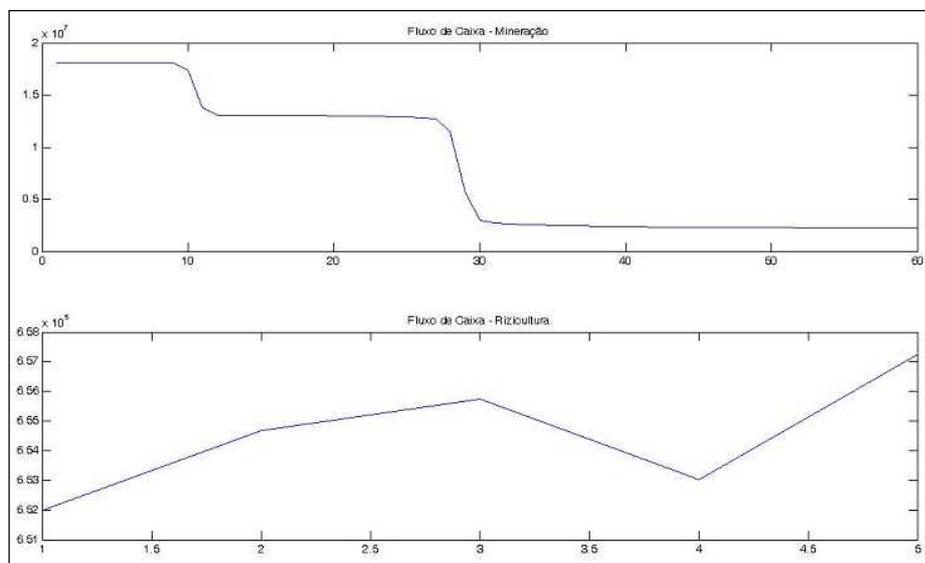


Figura 43: Fluxo de caixa setorial no caso base

No fluxo de caixa apresentado pelo setor mineral, percebem-se declínios no gráfico que se relacionam com a transição da produção máxima para a produção mínima de cada grupo de agentes. Em relação aos empreendedores agrícolas, pode-se verificar que o fluxo de caixa do setor se assemelha àquele apresentado pelo Agente 9, tendo em vista que a participação deste é maior que a do Agente 7.

5.3.6 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada a fim de verificar o comportamento do Valor Presente Líquido com a alteração de uma única variável, mantendo-se as demais em valores constantes. Em outras palavras, aplica-se o conceito de alternância de valores de uma variável, *coeteris paribus*.

A única verificação que não se relaciona com o VPL é a análise da concentração de contaminantes com a produção mensal nos meses de captação de água para irrigação.

Ressalta-se que todas as verificações são realizadas, adotando-se a alocação ótima obtida na análise principal do caso.

1ª Verificação: Valor Presente Líquido x Vazão Disponível

Sem a imposição de limites de concentração, não há variação no Valor Presente Líquido dos agentes mineiros, pois a falta desta faz com que os únicos limitadores para exploração das reservas de carvão sejam as capacidades máximas e mínimas de produção. A figura 44 apresenta o VPL dos agentes mineiros.

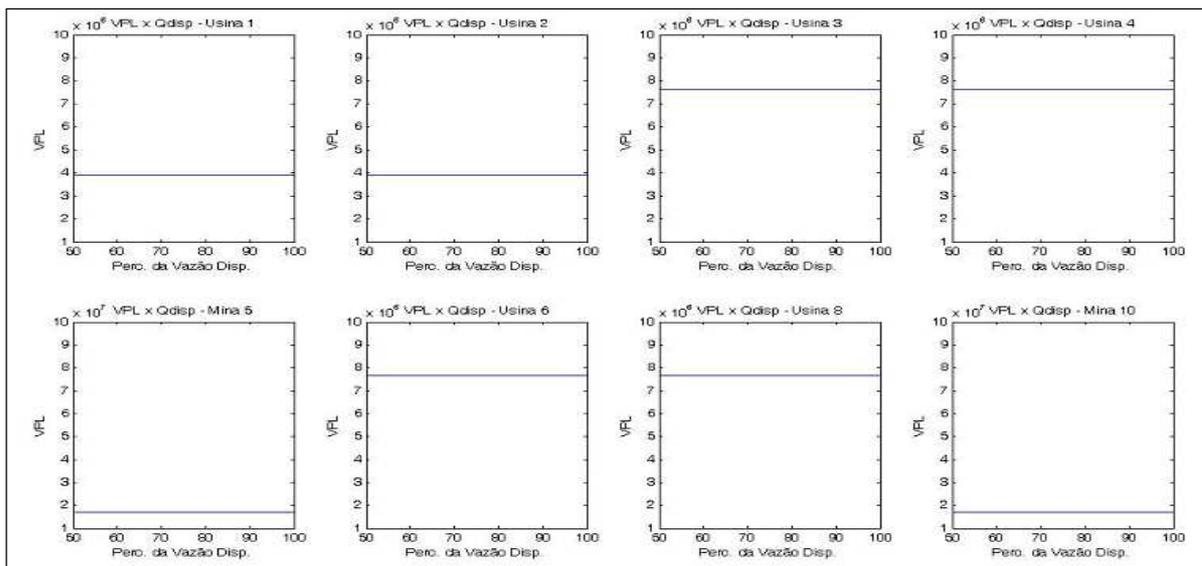


Figura 44: Variação do VPL de mineradores com a vazão disponível no caso base

Os valores constantes também podem ser visualizados na tabela 24.

Tabela 24: VPL de agentes mineiros no caso base

Agentes	VPL (R\$)
Usinas 1 e 2	3.885.934,25
Usinas 3, 4, 5 e 6	7.655.046,29
Minas 5 e 10	16.927.841,55

Em paralelo, os valores considerados para os dados de entrada dos agentes agrícolas possibilitam o trabalho, em qualquer valor da vazão disponível, com a área plantada máxima permitida para cada agente. Dessa forma, verifica-se que também não há alteração de VPL dos agentes agrícolas. A figura 45 apresenta o VPL dos agentes agrícolas.

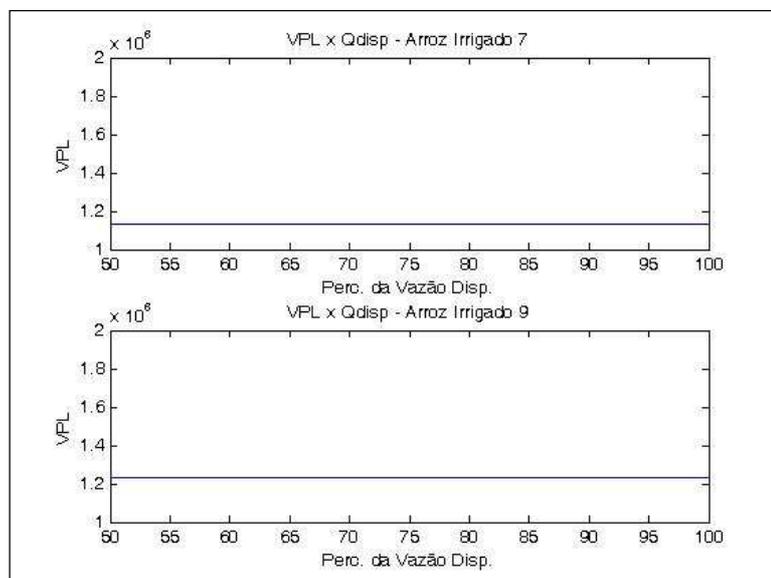


Figura 45: Variação do VPL de agricultores com o percentual da vazão disponível.

Os valores constantes podem ser mais bem visualizados na Tabela 25.

Tabela 25: VPL de agentes agrícolas

Agentes	VPL (R\$)
Arroz irrigado 7	1.130.328,23
Arroz irrigado 9	1.231.075,46

Como consequência do que foi apresentado para os agentes, o gráfico setorial e o gráfico do VPL total na bacia também não se alteram, conforme Figura 46.

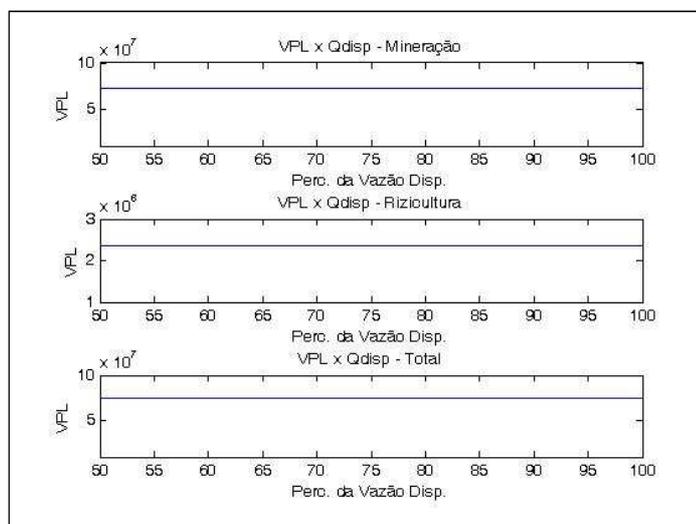


Figura 46: Variação do VPL setorial com o percentual da vazão disponível no caso base

Os valores constantes podem ser mais bem visualizados na tabela 26.

Tabela 26: VPL por setor de atividade econômica no caso base

Setores	VPL (R\$)
Mineração	72.247.736,76
Rizicultura	2.361.403,69
Total	74.609.140,45

2ª Verificação: Valor Presente Líquido x Reserva de Carvão

O Valor Presente Líquido das atividades da bacia está relacionado com sua capacidade de produção. Assim sendo, a presente verificação tem por objetivo observar o comportamento do VPL com a variação da reserva de carvão a ser explorada nas minas e beneficiada nas usinas. A figura 47 apresenta o comportamento do VPL de cada agente mineiro em função da reserva de carvão disponível.

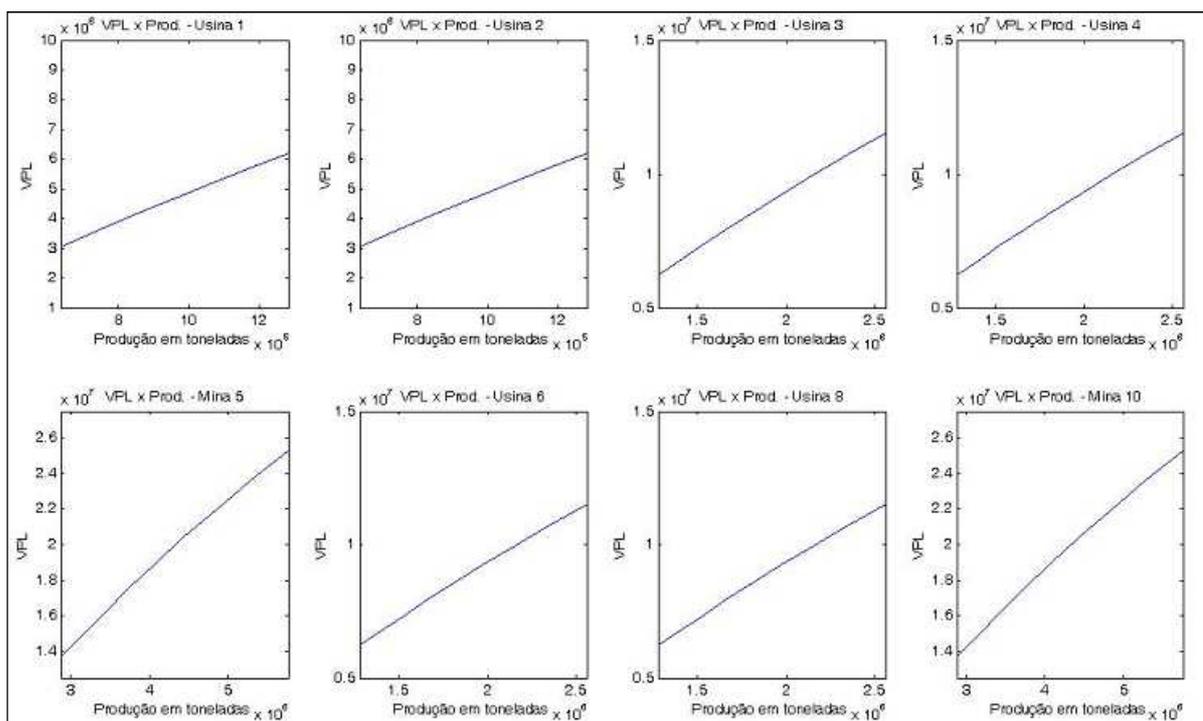


Figura 47: Variação do VPL de mineradores com a reserva de carvão no caso base

Verifica-se uma elevação do VPL de forma quase linear à medida que a reserva a ser utilizada no período se eleva. Interessa, ainda, verificar o comportamento do VPL total da bacia com o aumento da reserva. A figura 48 apresenta tal situação.

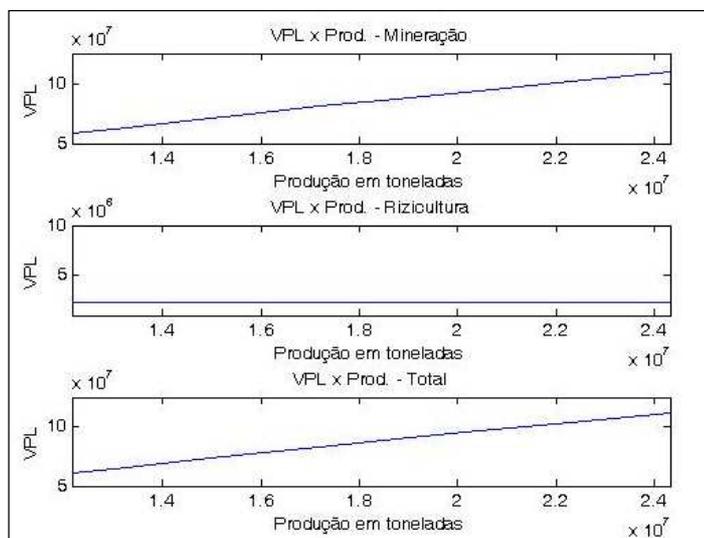


Figura 48: Variação do VPL setorial com a reserva de carvão disponível no caso base

Percebe-se que a variação do VPL total da bacia se aproxima daquela verificada para o setor de mineração. Tal constatação tem como fundamento o fato de ser este setor maior gerador de renda que o setor agrícola na região. Verifica-se, também, que não há variação do VPL dos agentes mineiros com o aumento da reserva de carvão, tendo em vista que a reserva de minério em nada influencia as atividades agrícolas.

3ª Verificação: Valor Presente Líquido x Área Plantada

O Valor Presente Líquido em função da área plantada tem para os agentes agrícolas o mesmo comportamento que apresenta em função da reserva para os agentes mineiros. No entanto, em relação à bacia, o aumento da área plantada (dentro das possibilidades encontradas) não gera elevação significativa do Valor Presente Líquido total. A figura 49 apresenta o comportamento do VPL em função da área plantada tanto para os agentes agrícolas quanto para o total da bacia.

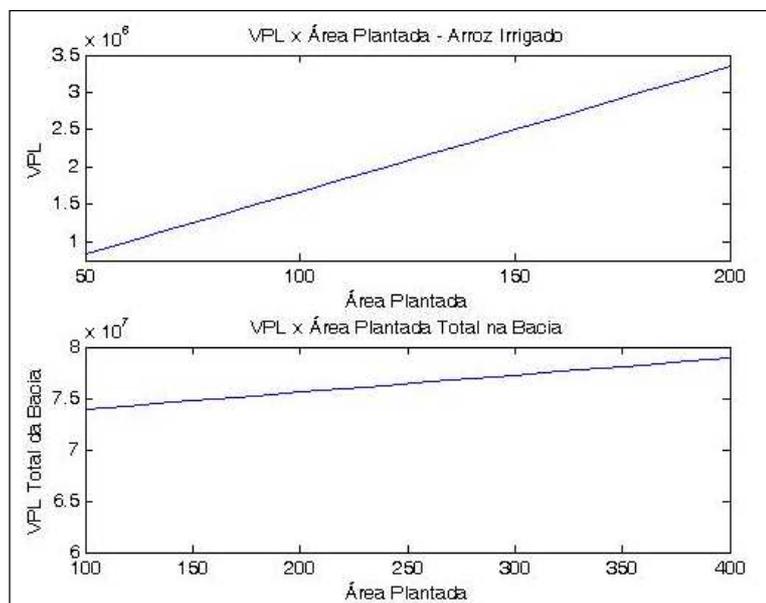


Figura 49: Variação do VPL com a área plantada (em hectares) na bacia (caso base)

Verifica-se, facilmente, que a elevação do VPL é mais evidente, em termos relativos, para os agentes agrícolas do que para o total da bacia. Conforme já comentado, tal fato se deve à maior participação das atividades carboníferas no total da renda gerada na bacia.

4ª Verificação: Valor Presente Líquido x Preços

A presente verificação pode ser dividida em três partes. As duas primeiras se referem à variação do VPL em função do preço do carvão mineral e em função do preço do arroz. A terceira diz respeito à variação do VPL em função tanto do preço do carvão quanto do arroz.

A figura 50 apresenta o VPL dos agentes mineiros em função do preço do carvão.

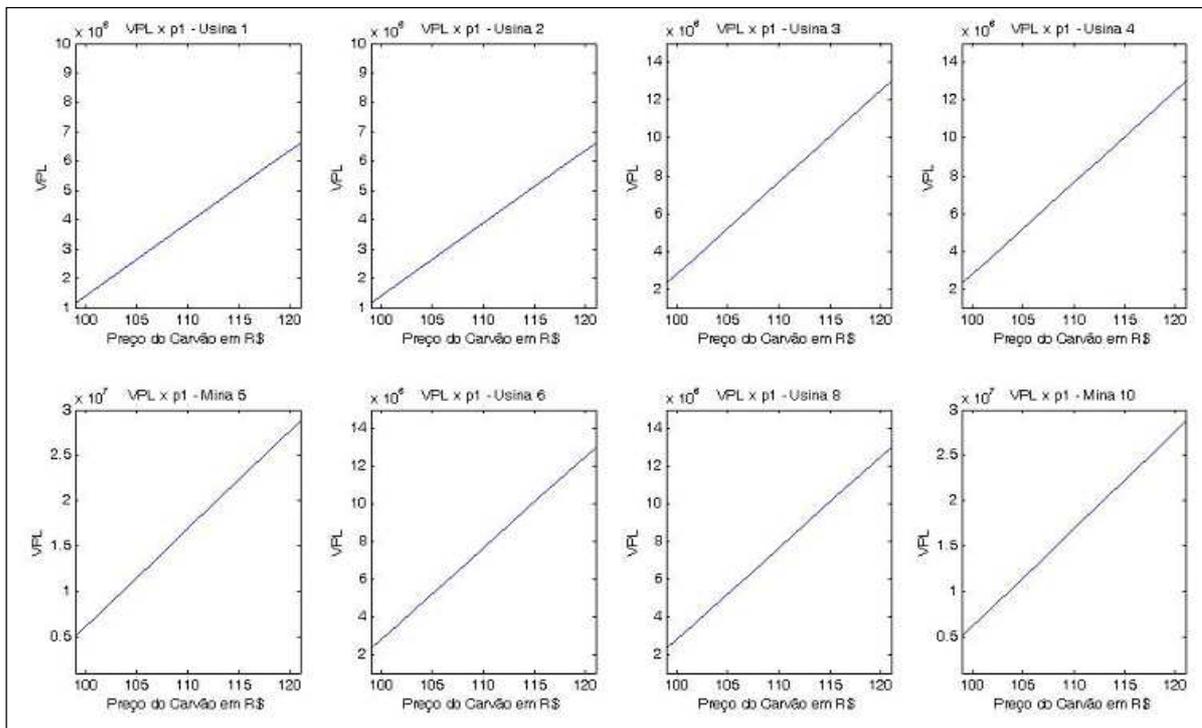


Figura 50: Variação do VPL de mineradores com o preço do carvão no caso base

Verifica-se um aumento linear do VPL de cada um dos agentes mineiros. A figura 51 apresenta a variação do VPL dos setores em função do preço do carvão.

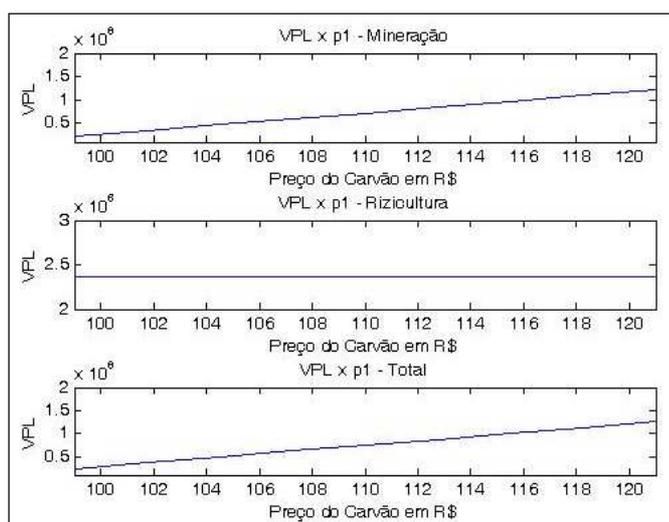


Figura 51: Variação do VPL setorial com o preço do carvão no caso base

Verifica-se que o VPL total da bacia varia praticamente conforme o VPL do setor carvoeiro. Em paralelo, a variação do preço do carvão mineral não altera o VPL dos agentes agrícolas.

A figura 52 apresenta a variação do VPL dos agentes agrícolas em função da variação do preço da tonelada de arroz.

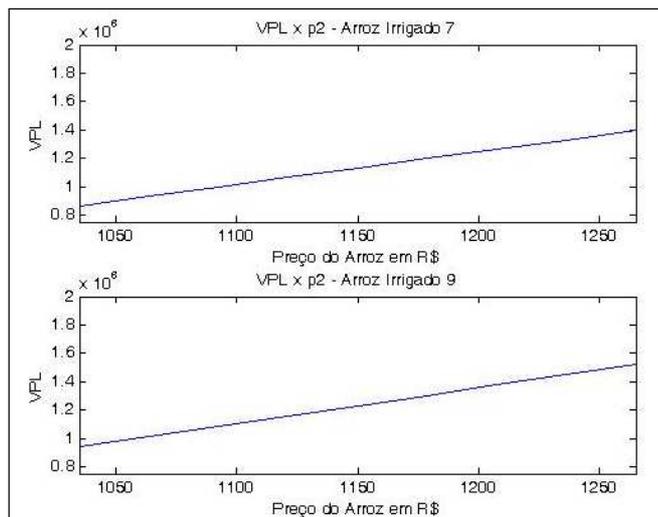


Figura 52: Variação do VPL de agricultores com o preço do arroz no caso base

Verifica-se um aumento linear do VPL dos agentes agrícolas. O agente 9 por dispor de maior área de plantio apresenta maiores valores absolutos para o VPL. A figura 53 apresenta a variação do VPL dos setores em função do preço do arroz.

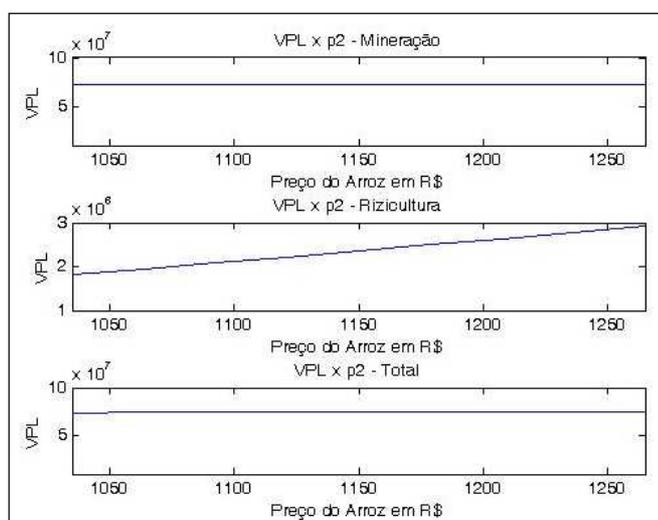


Figura 53: Variação do VPL setorial com o preço do carvão no caso base

Verifica-se que o VPL total da bacia varia muito pouco em função do preço do arroz. Assim como no caso da área plantada, constata-se a baixa participação da rizicultura no VPL da bacia. Em paralelo, a variação do preço do arroz não altera o VPL dos agentes mineiros.

A terceira parte da presente verificação consiste na variação conjunta dos preços do arroz e do carvão, considerando os dois partindo de seus valores mínimos até seus valores máximos. A figura 54 apresenta o gráfico do VPL em função da variação conjunta dos preços dos recursos naturais.

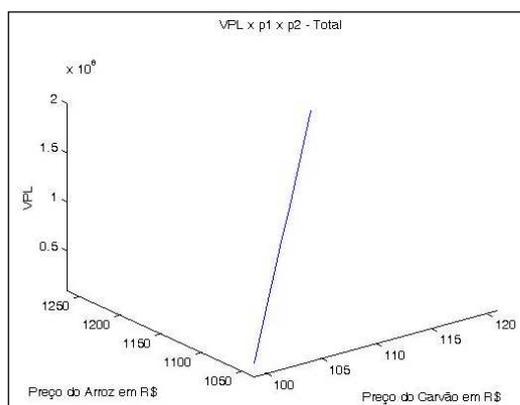


Figura 54: Variação do VPL total com os preços do carvão e do arroz no caso base

5ª Verificação: Concentração de Contaminantes x Produção Mensal

A quinta e última verificação da análise de sensibilidade leva em consideração apenas o setor de mineração. Ela consiste na verificação da concentração de contaminantes na água alocada para cada agente mineiro. Cabe salientar que a verificação é feita apenas para a concentração de ferro, tendo em vista que este é o parâmetro de qualidade da água mais restritivo quando se leva em consideração a razão entre a composição do efluente e o limite de concentração permitido.

A concentração de contaminantes ao longo do tempo está relacionada diretamente com a quantidade de água disponível para dissolução dos contaminantes. Conforme já mencionado, a água disponível para dissolução dos efluentes gerados pelos agentes mineiros depende da parcela de água que se deseja utilizar na bacia e da parcela de água alocada para a irrigação. Dessa forma, a análise é feita apenas para os meses de outubro, novembro e dezembro (meses em que se considera a captação de água para irrigação), variando-se as

alternativas de alocação de água e a quantidade de água a ser disponibilizada para alocação entre agentes mineiros e agrícolas.

A primeira observação diz respeito às usinas de beneficiamento 1 e 2. Tais agentes, por se situarem próximos à nascente do Rio Sangão, têm a possibilidade de utilizar apenas 2%, cada um, da vazão total do exutório na dissolução de seus efluentes. A figura 55 apresenta a concentração de ferro na água alocada em função da produção mensal, considerando-se que toda a vazão do Rio Sangão pode ser utilizada.

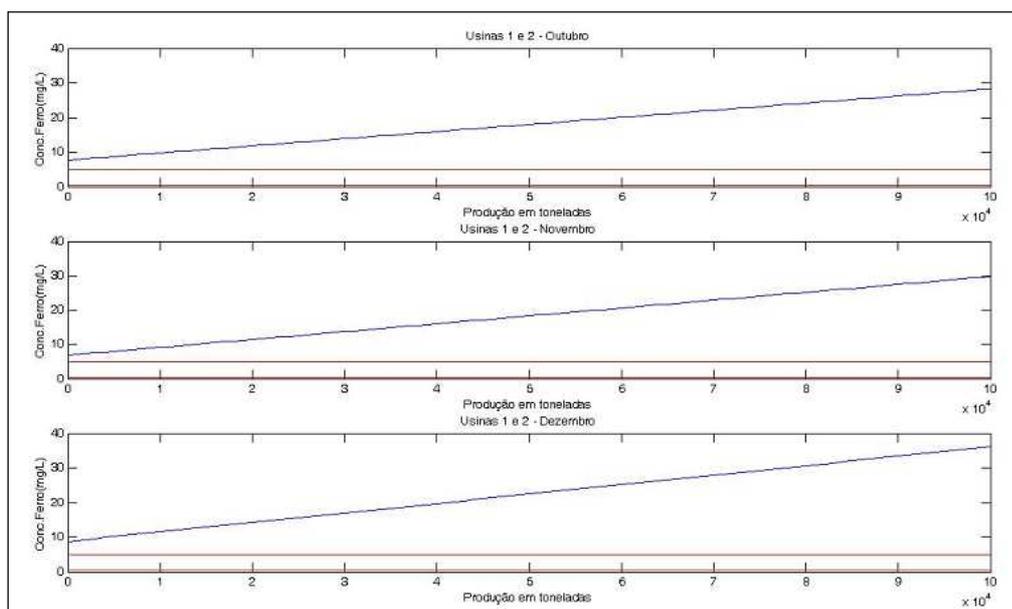


Figura 55: Conc. de Fe para as usinas 1 e 2 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base

As linhas vermelhas nos gráficos representam os limites de concentração de ferro para enquadramento nas classes 1 e 3. Pode-se verificar que, para qualquer produção mensal desejada, os limites são violados nos três meses do ano analisados.

A figura 56 apresenta a situação da concentração de ferro para as usinas 3, 4, 6 e 8.

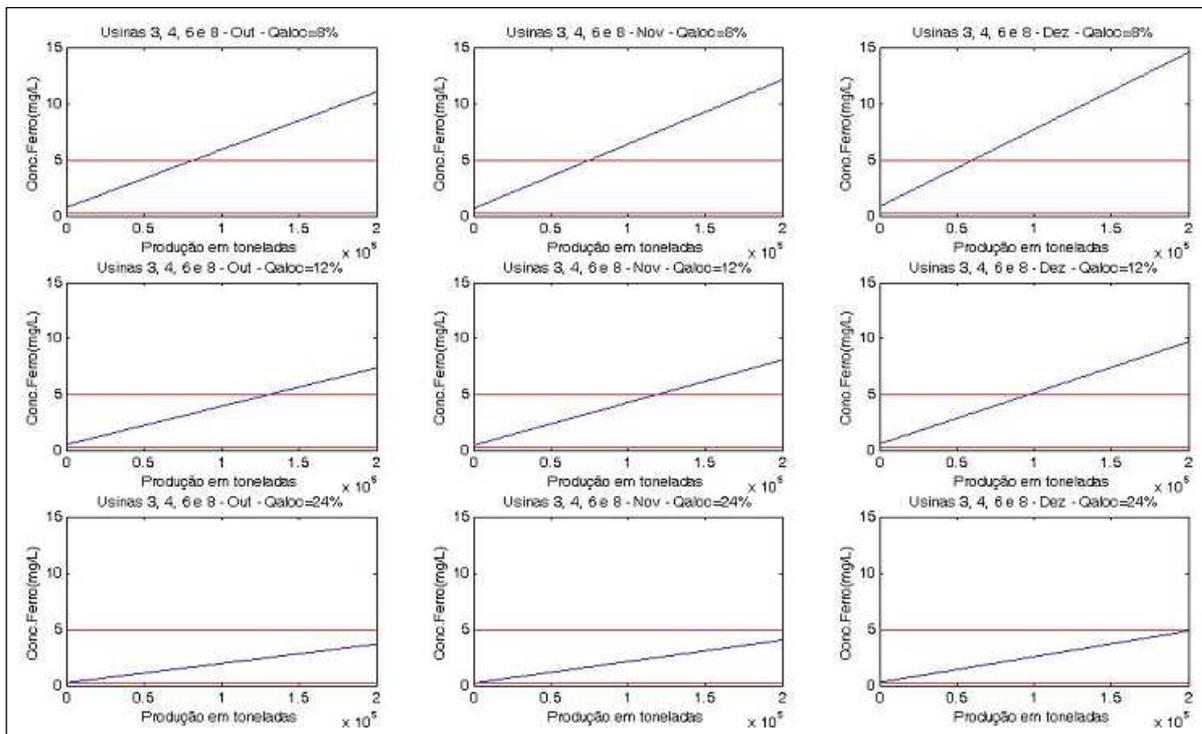


Figura 56: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base

Verifica-se, com facilidade, que o enquadramento na classe 1 não é possível sem que haja tratamento de efluentes. Devido à vazão disponível para alocação, o enquadramento na classe 3 pode ocorrer para esses agentes sem necessidade de tratamento de efluentes, desde que seja adotada a alternativa de maior alocação de água (o que não é possível para todas as atividades). É possível o enquadramento na classe 3 com a alocação mínima (8%) e sem tratamento de efluentes, se a produção se situar em torno de 50.000 toneladas por mês. Ainda assim, na ocorrência de vazões inferiores às médias mensais, a concentração de contaminantes violaria os limites legais. A figura 57 apresenta as condições referentes às minas 5 e 10.

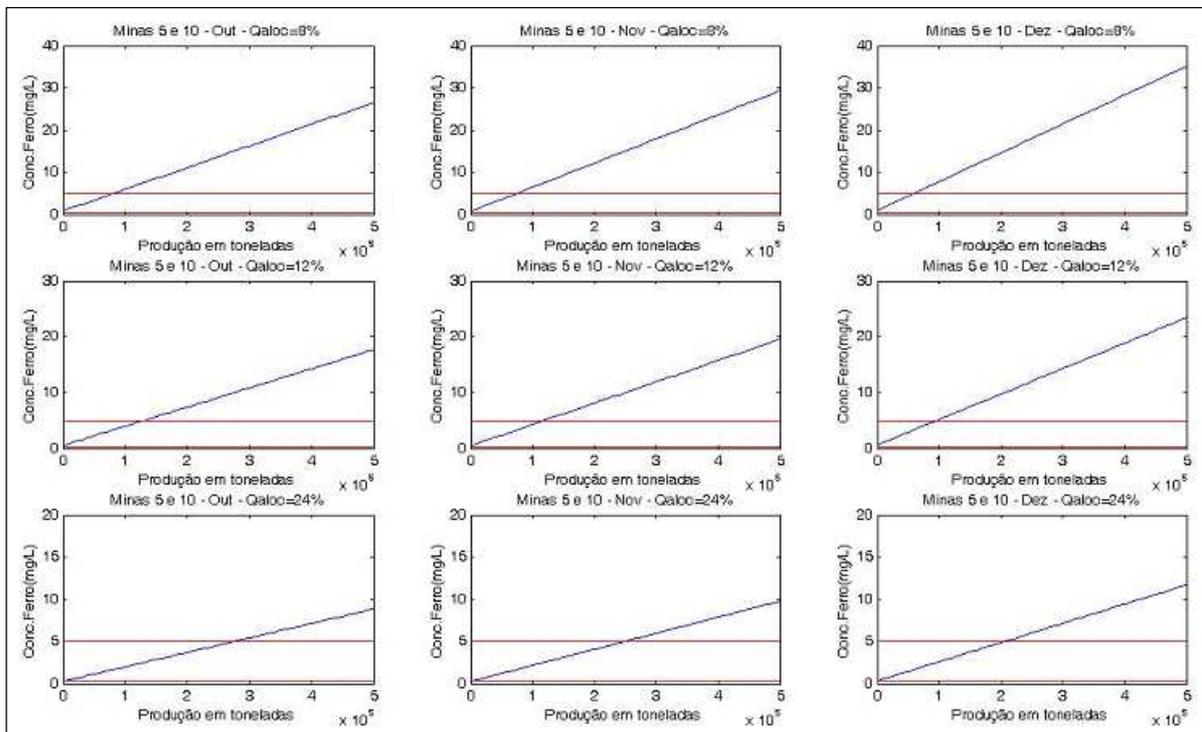


Figura 57: Conc. de Fe para as Minas 5 e 10 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso base

Verifica-se que, dada a maior produção dessas minas, o limite de concentração de ferro para enquadramento na classe 1 é violado em todos os meses. O enquadramento na classe 3 é possível, porém, na ausência de tratamento, requer que as minas operem com baixa produção.

5.4 CASO 1: ENQUADRAMENTO NA CLASSE 3 COM 100% DA VAZÃO DISPONÍVEL

O caso 1 consiste na tentativa de enquadramento das águas da bacia na classe 3. Para isso, com fundamento nos resultados obtidos no caso base, o enquadramento na classe 3 ocorre com a imposição do tratamento passivo de efluentes a todos os agentes mineiros. Tal tipo de tratamento é o mais simples empregado no modelo.

Todas as condições consideradas para os agentes agrícolas foram mantidas.

5.4.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos

A tabela 27 apresenta as formas mais frequentes de alocação nas otimizações.

Tabela 27: Alocação ótima de recursos hídricos no caso 1

Agente	Alocações ótimas		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Usina 1	2%	2%	2%
Usina 2	2%	2%	2%
Usina 3	8%	8%	8%
Usina 4	8%	8%	8%
Mina 5	8%	8%	8%
Usina 6	8%	8%	8%
Arroz irrigado 7	24%	12%	24%
Usina 8	8%	8%	8%
Arroz irrigado 9	24%	24%	12%
Mina 10	8%	8%	8%
FREQUÊNCIA	26,5734%	0,1598%	0,1597%

Assim como no caso base, a alocação ótima é aquela em que os agentes agrícolas recebem a maior parcela da vazão disponível. Neste caso, a explicação se dá pelo fato de que o tratamento aplicado diminui a concentração de contaminantes, fazendo com que a soma das descargas dos demais agentes mineiros se situe em patamares aceitáveis para a classe 3 de uso das águas. Assim a produção pode ser mantida dentro do planejamento e a água fica disponível para os agentes agrícolas.

Dessa forma, o recurso hídrico é preterido para a mineração em favor da rizicultura, elevando sua produção e, em consequência o valor presente líquido gerado na bacia.

No entanto, deve-se salientar que são desconhecidos os efeitos da concentração dos contaminantes considerados no desenvolvimento da cultura de arroz, bem como no seu consumo, ainda que tais concentrações se dêem em quantidades permitidas pela Resolução CONAMA 357.

5.4.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido

Verificou-se que a função objetivo de maximização da renda total dos agentes instalados na bacia apresenta o valor médio de R\$ 70.393.924,04 com desvio padrão de R\$ 26.741.547,82. A tabela 28 relaciona os agentes instalados na bacia e os valores de média e desvio padrão do VPL de cada um.

Tabela 28: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 1

Agente	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Usina 1	3.610.092,49	1.413.545,59
Usina 2	3.592.901,54	1.409.767,54
Usina 3	7.214.091,14	2.800.673,98
Usina 4	7.207.715,54	2.806.650,95
Mina 5	15.987.563,81	6.894.796,65
Usina 6	7.206.711,39	2.797.809,29
Arroz irrigado 7	1.190.879,02	140.880,70
Usina 8	7.207.747,42	2.796.597,18
Arroz irrigado 9	1.288.374,19	149.133,49
Mina 10	15.887.847,50	6.897.794,52

A tabela 29 apresenta o VPL para o agrupamento dos agentes por setor.

Tabela 29: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 1

Setor	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Mineração	67.914.670,84	26.722.938,49
Rizicultura	2.479.253,21	252.499,29
TOTAL	70.393.924,04	26.741.547,82

A figura 58 apresenta o VPL obtido em cada simulação para cada um dos agentes mineiros instalados na bacia.

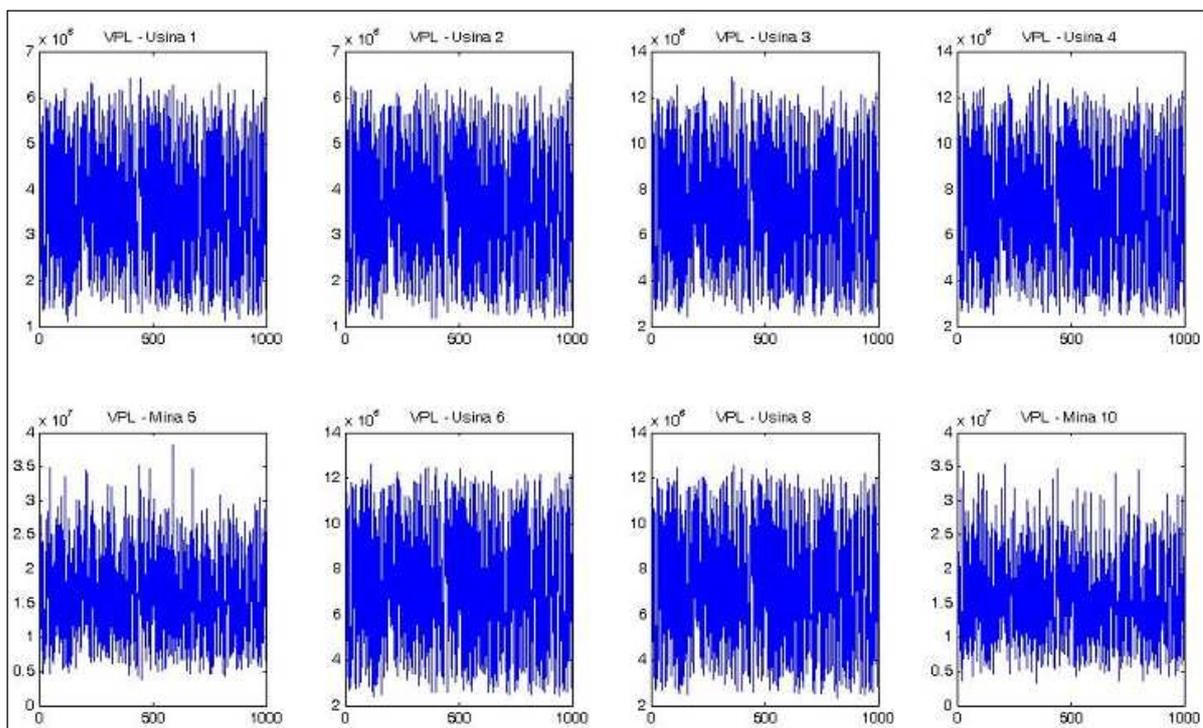


Figura 58: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 1

Pode-se constatar que as Usinas de Beneficiamento 1 e 2 variam seus respectivos VPL entre, aproximadamente, R\$ 1,0 milhões e R\$ 6,0 milhões. As Usinas 3, 4, 6 e 8 têm VPL variando entre, aproximadamente, R\$ 2,0 milhões e R\$ 12,0 milhões. Por fim, as Minas 5 e 10 variam o VPL entre R\$ 5 milhões e R\$ 35 milhões, aproximadamente. A redução em relação ao caso base se deve aos custos com o tratamento de efluentes.

A figura 59 mostra os histogramas dos agentes mineiros instalados na bacia.

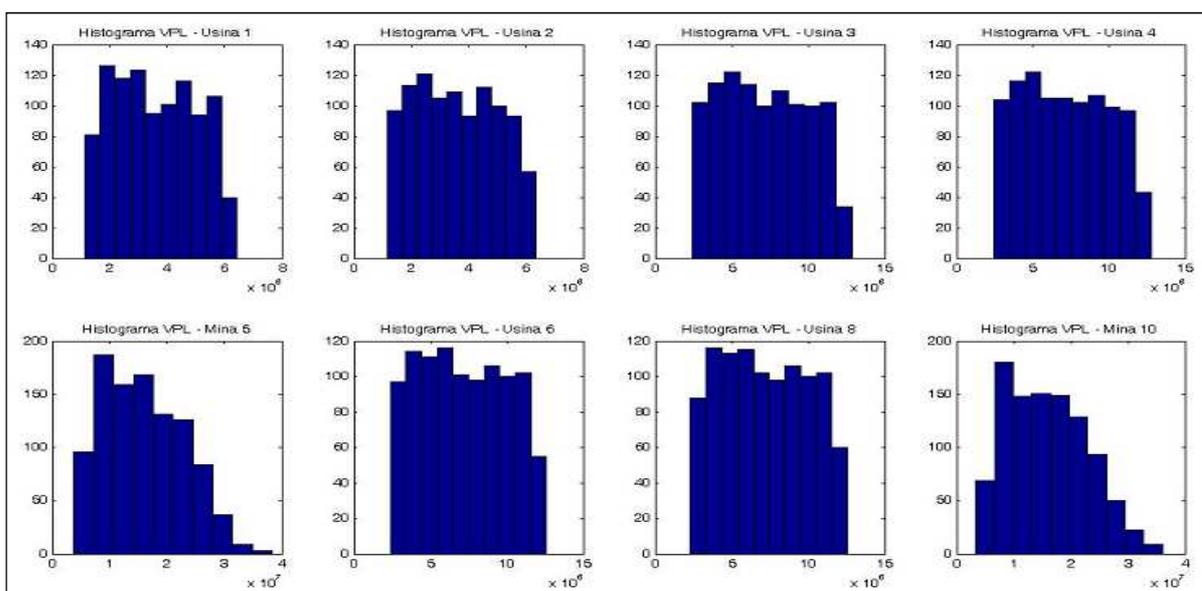


Figura 59: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 1

Com exceção da última barra, as usinas de beneficiamento apresentam os demais grupos de VPL com probabilidade de ocorrência entre 8% e 12%. As usinas 3, 4, 6 e 8 apresentam configuração que mostra maior ocorrência para os valores de R\$ 9,5 milhões a R\$ 11,5 milhões.

As minas subterrâneas (agentes 5 e 10) apresentam distribuição de frequência assimétrica com destaque para a maior ocorrência da faixa de valores entre R\$ 7,5 milhões a R\$ 20,0 milhões.

A figura 60 traz o VPL dos agentes agrícolas para cada simulação executada.

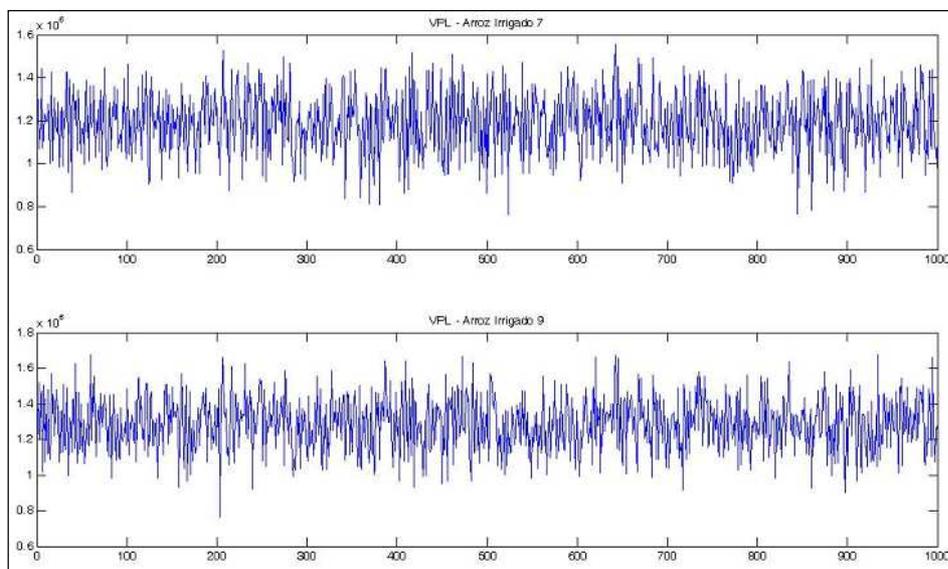


Figura 60: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 1

Verifica-se que o agente 7 apresenta VPL que varia entre, aproximadamente R\$ 800 mil e R\$ 1,6 milhão. O agente 9 varia seu VPL de, aproximadamente R\$ 800 mil a R\$ 1,7 milhão. A figura 61 traz os histogramas dos agentes 7 e 9.

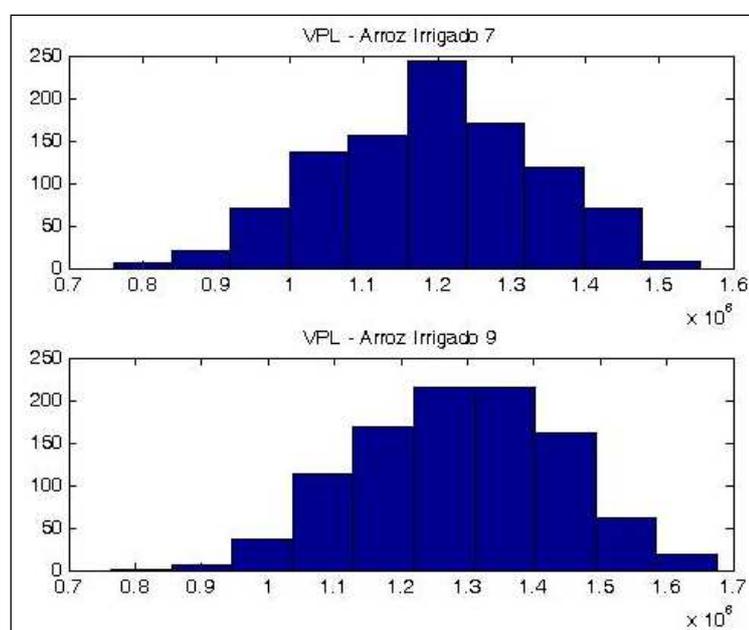


Figura 61: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 1

Assim como no caso base, para os agentes agrícolas, pode-se admitir que os valores médios são aqueles que ocorrem com maior frequência nas simulações. Em quase 45% das

ocorrências, o VPL do agente 7 se situa entre R\$ 1,1 milhão e R\$ 1,3 milhão. Para o agente 9, aproximadamente 45% das ocorrências tiveram como resultado o VPL entre R\$ 1,2 milhão e R\$ 1,4 milhão.

A figura 62 apresenta a variabilidade do VPL por setor e o total da bacia.

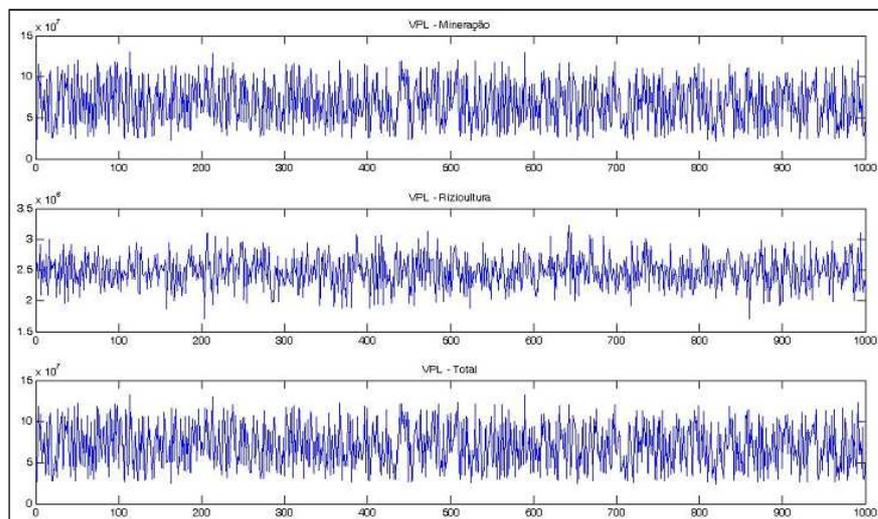


Figura 62: Comportamento do VPL por setor no caso 1

Verifica-se a variação do VPL do setor mineral entre R\$ 35 milhões e 125 milhões que, por sua vez, são semelhantes à variação do VPL total da bacia já que o setor agrícola responde por pequena participação. A variação de VPL do setor agrícola se situa entre R\$ 1,5 milhão e R\$ 3,25 milhões. A figura 63 apresenta os histogramas do VPL por setor e o total da bacia.

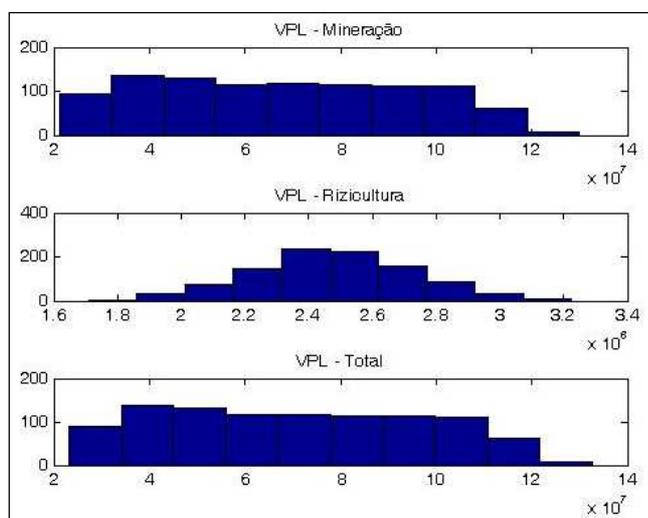


Figura 63: Histograma dos VPL por setor no caso 1

Portanto, em aproximadamente 90% das ocorrências a mineração gera uma renda entre R\$ 20 milhões e R\$ 105 milhões e em aproximadamente 80% das ocorrências, o setor agrícola gera entre R\$ 2,3 milhões e R\$ 2,8 milhões.

5.4.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais

A figura 64 apresenta o comportamento da produção de carvão mineral pelas minas e pelas usinas de beneficiamento ao longo do horizonte de 60 meses de planejamento.

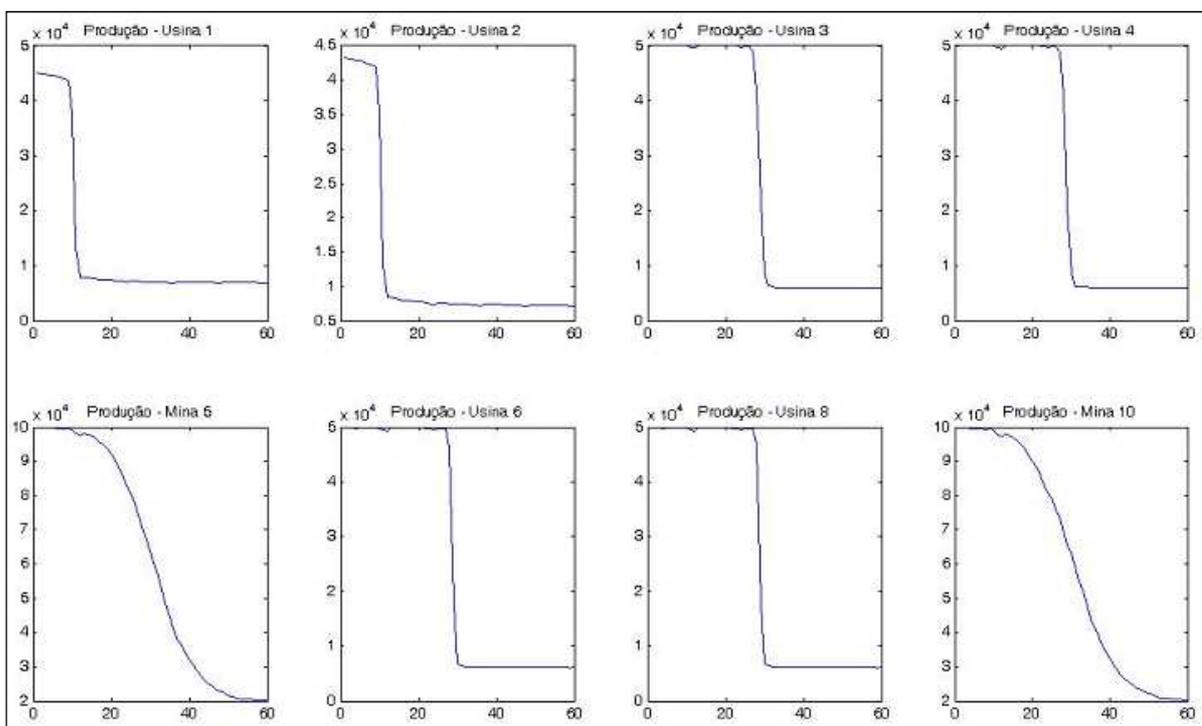


Figura 64: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 1

Pode-se perceber que os agentes mineiros, apesar de contarem com o tratamento passivo de efluentes, apresentaram dificuldade em manter a produção em níveis elevados. Podem ser verificados, trechos de queda da produção quando esta se situa no limite máximo. Essas quedas se devem à redução do efluente gerado para atendimento dos limites da Resolução CONAMA 357.

A figura 65 apresenta a evolução da produção de arroz no período considerado.

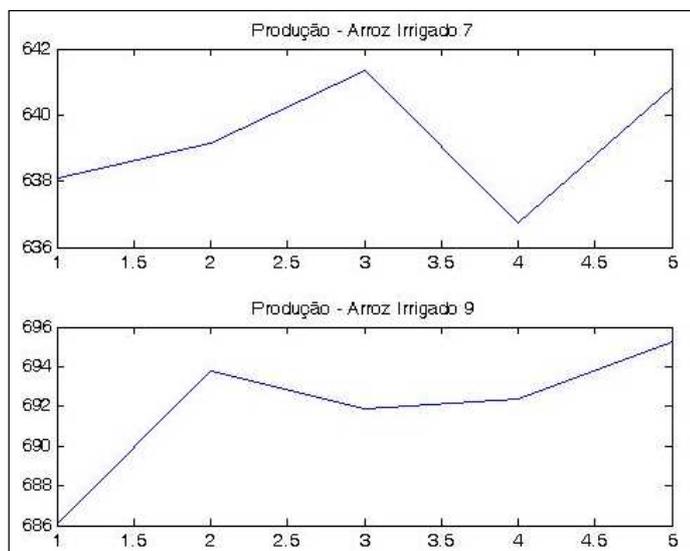


Figura 65: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 1

Tendo em vista que não são considerados os efeitos da concentração de contaminantes na produtividade agrícola, não há diferenças significativas entre a produção no caso 1 em relação ao caso base.

5.4.4 Comportamento da Qualidade da Água

A figura 66 apresenta o comportamento da concentração de ferro na água alocada para cada um dos agentes mineiros.

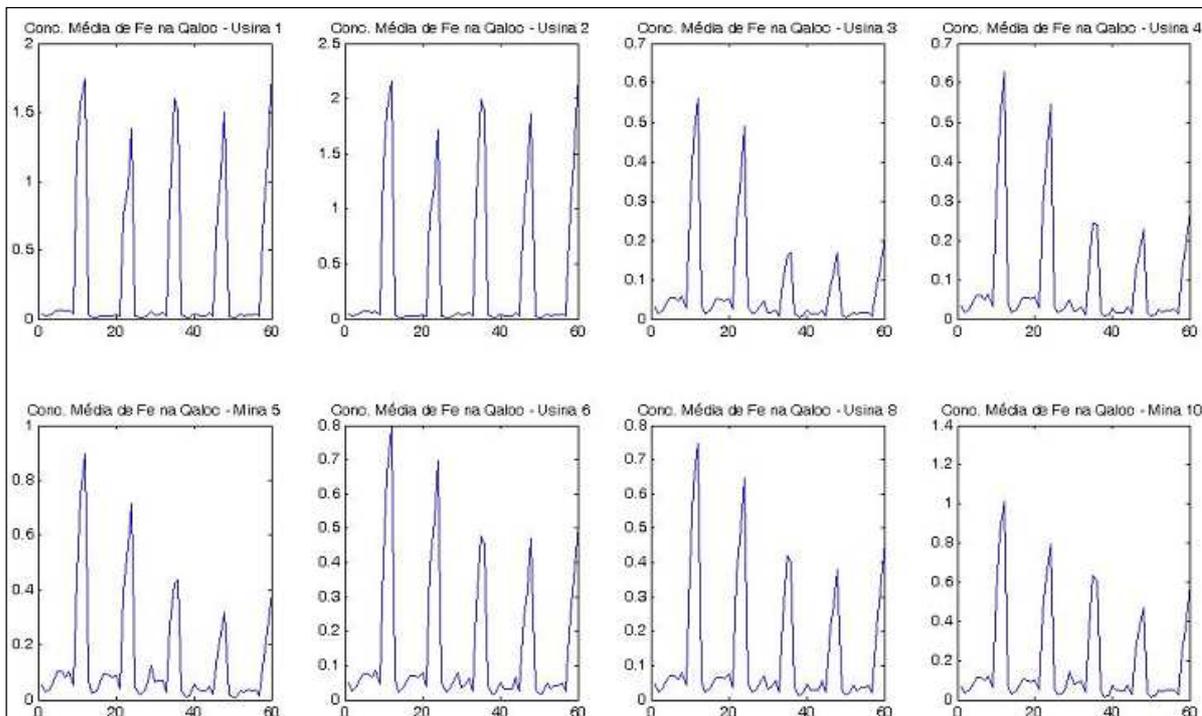


Figura 66: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso 1

Mesmo dispondo de tratamento com menor potencial, os agentes mineiros apresentam concentrações inferiores ao limite de 5,0 mg/L. Os picos mostrados no gráfico se referem aos períodos em que parte do volume de água é destinado à irrigação das culturas de arroz. Nos períodos em que não é considerada a irrigação, o contaminante tem maior volume de água para dispersão.

Para os demais contaminantes, a concentração se comporta de maneira semelhante. A figura 67 apresenta a concentração média de sulfatos.

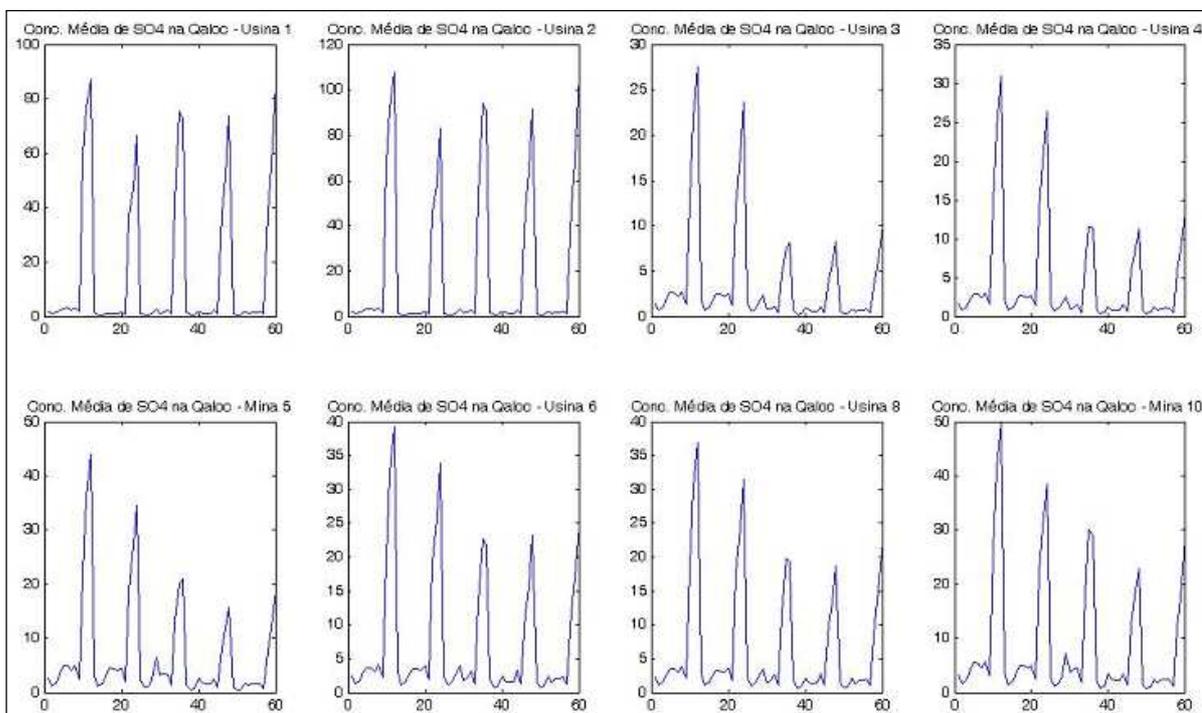


Figura 67: Conc. média de SO₄ na água alocada para os agentes mineiros no caso 1

A concentração de manganês comporta-se no tempo conforme figura 68.

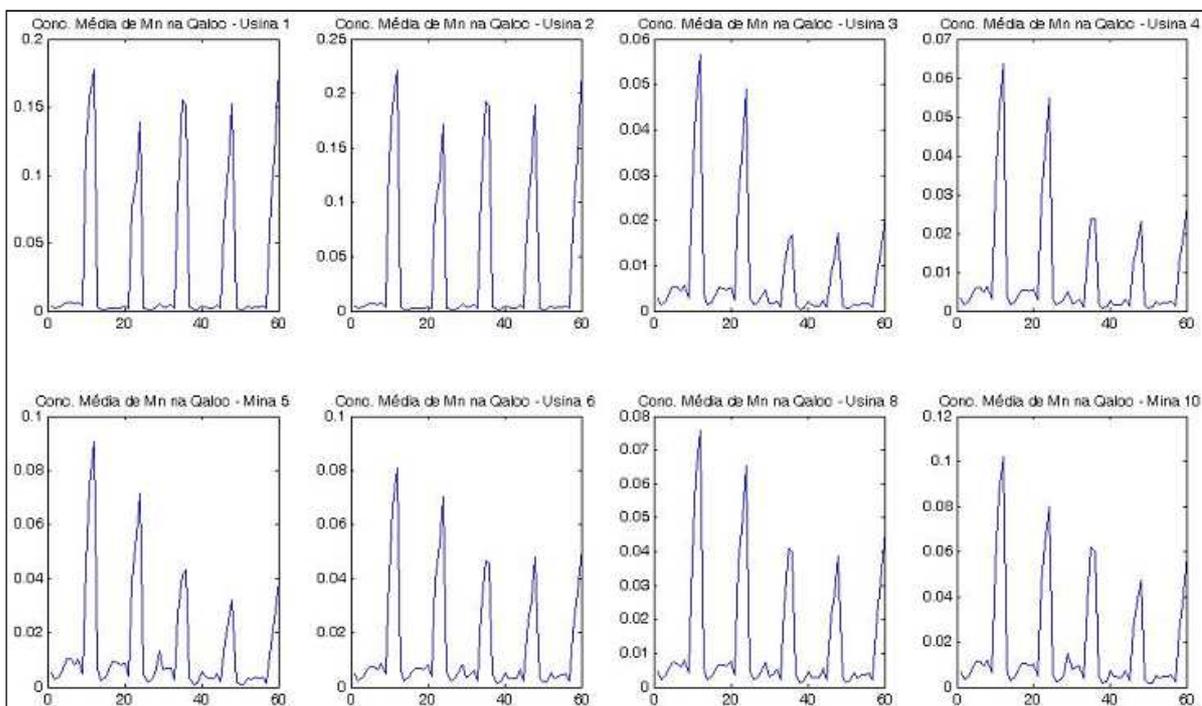


Figura 68: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso 1

Nos supostos pontos de monitoramento do Rio Sangão, as concentrações dos contaminantes são menores do que na água alocada para cada agente. A figura 69 apresenta as concentrações de ferro em tais pontos.

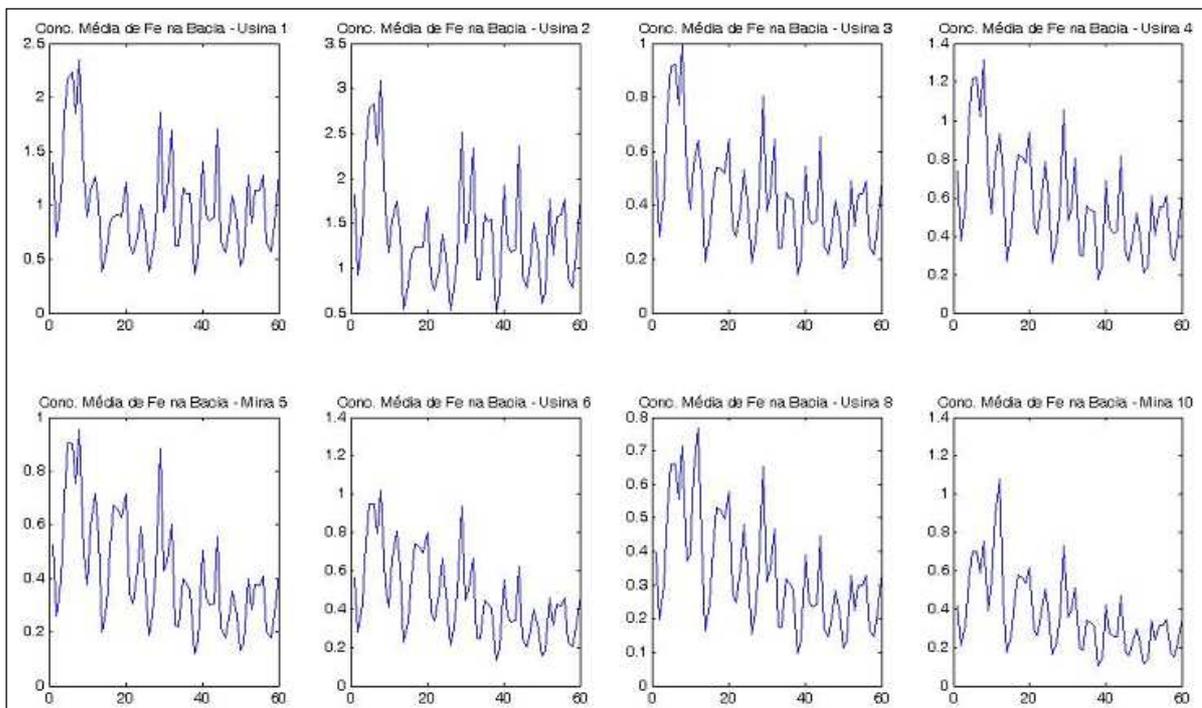


Figura 69: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1

Verifica-se que durante todo o período considerado a concentração de contaminantes nos pontos de monitoramento se situa dentro do que a Resolução CONAMA 357 permite para enquadramento na Classe 3. O enquadramento na classe 1 não é possível com a adoção do sistema passivo simples de tratamento de efluentes, tendo em vista a violação recorrente do limite de concentração de 0,3 mg/L por todos os agentes. A figura 70 mostra a concentração de ferro nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

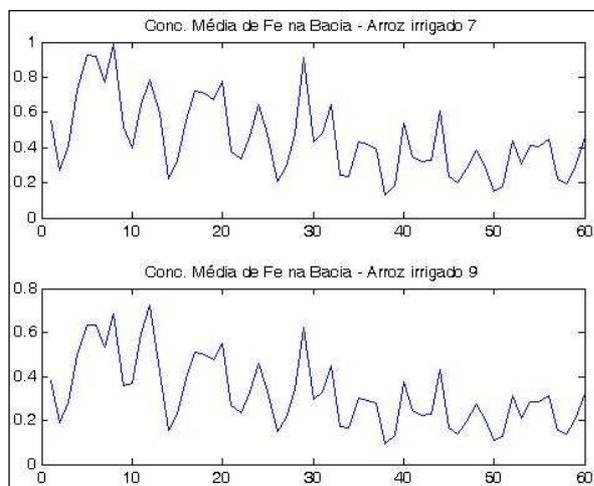


Figura 70: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1

Destaca-se que, apesar do enquadramento no limite legal, são desconsiderados os efeitos das concentrações obtidas na produtividade da cultura.

Os demais contaminantes considerados no presente estudo apresentam comportamento semelhante. A figura 71 apresenta a concentração de sulfatos nos pontos de monitoramento do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

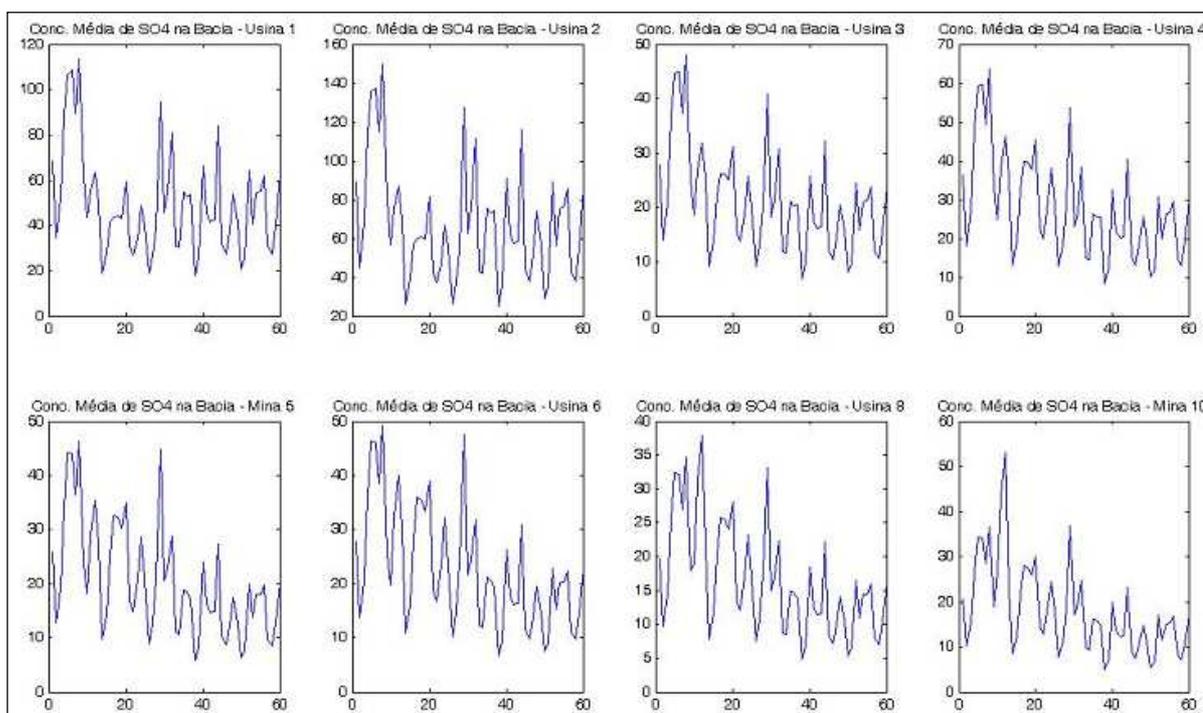


Figura 71: Conc. média de SO_4 nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1

A figura 72 mostra a concentração de sulfatos nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

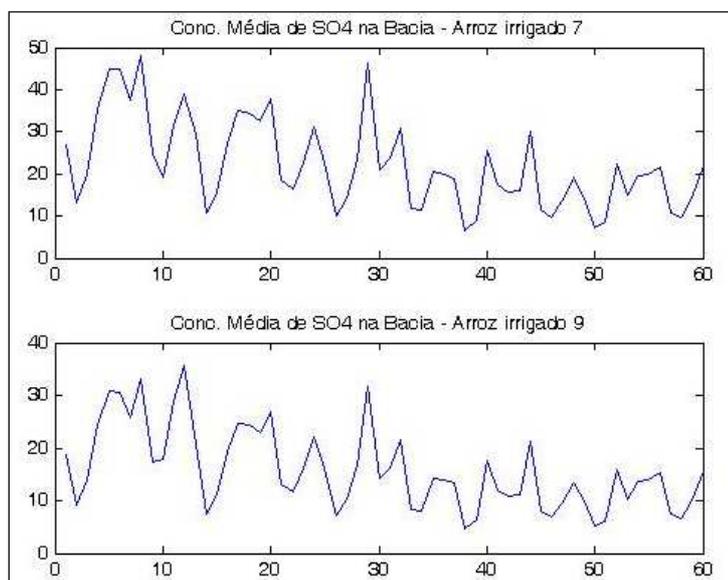


Figura 72: Conc. média de SO_4 nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1

A figura 73 apresenta a concentração de manganês nos pontos do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

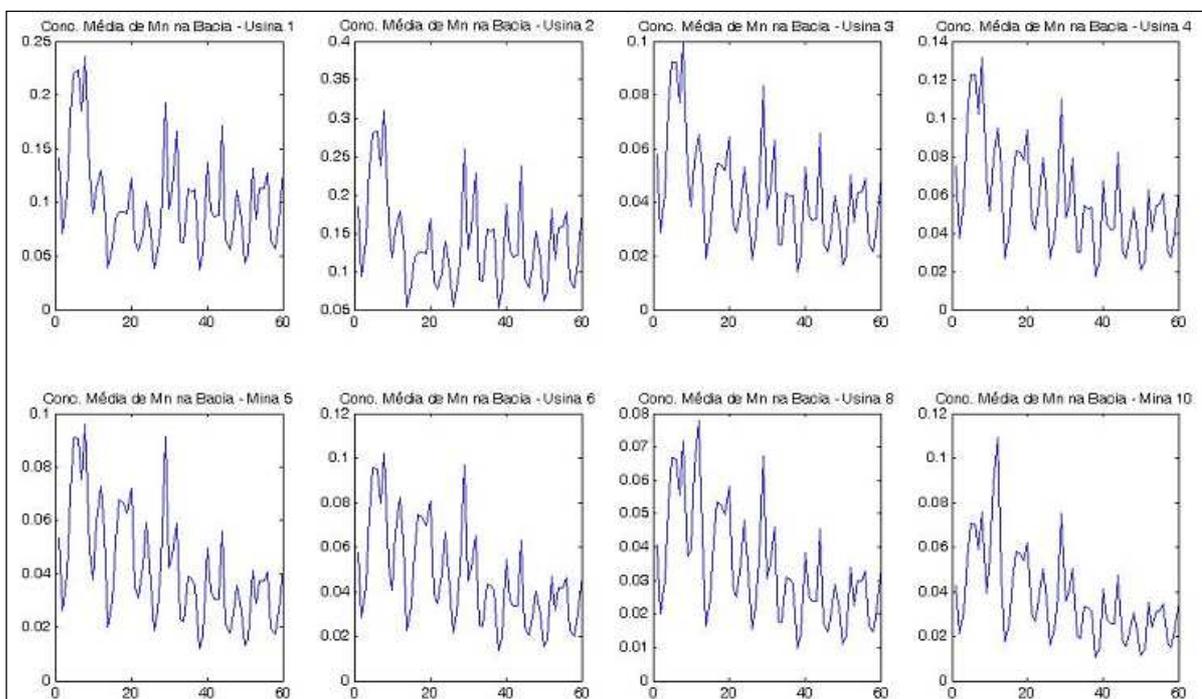


Figura 73: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 1

A figura 74 mostra a concentração de manganês nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

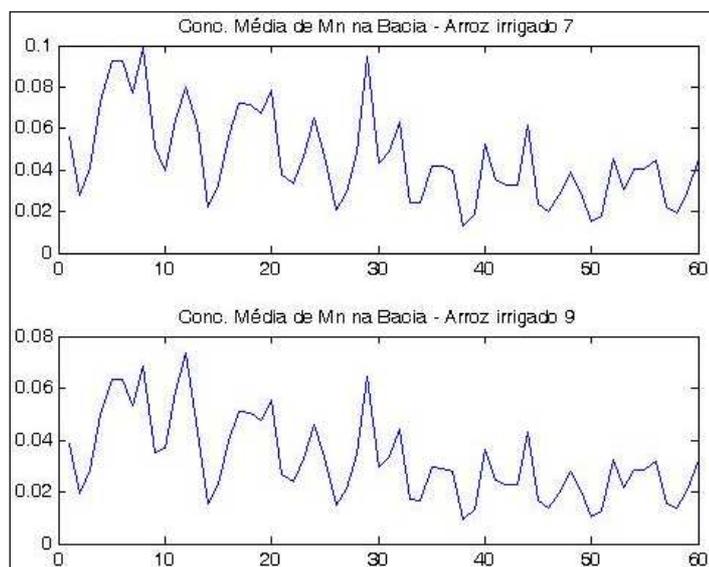


Figura 74: Conc. média de Mn nos pontos de captação de água para irrigação no caso 1

Por fim, verifica-se o comportamento da concentração dos contaminantes considerados no exutório da bacia. A figura 75 ilustra a questão.

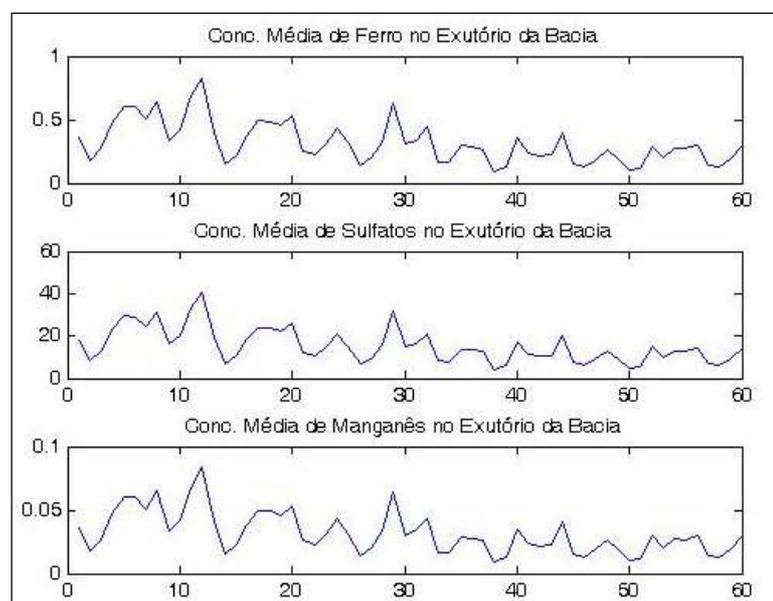


Figura 75: Concentração média de contaminantes no exutório da bacia.

Constata-se que os limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357 para enquadramento na Classe 3 são respeitados. Tal situação permite que bacias a jusante tenham enquadramento semelhante, ou até mesmo, superior em caso de haver vazão em

quantidade suficiente para diminuição das concentrações ocorridas. Ressalta-se, entretanto, que foi considerada toda a vazão do exutório disponível para alocação entre os agentes.

5.4.5 Comportamento do Fluxo de Caixa

Conforme já comentado, o fluxo de caixa se comporta de forma semelhante à produção dos respectivos recursos naturais. A figura 76 apresenta o fluxo de caixa dos agentes mineiros.

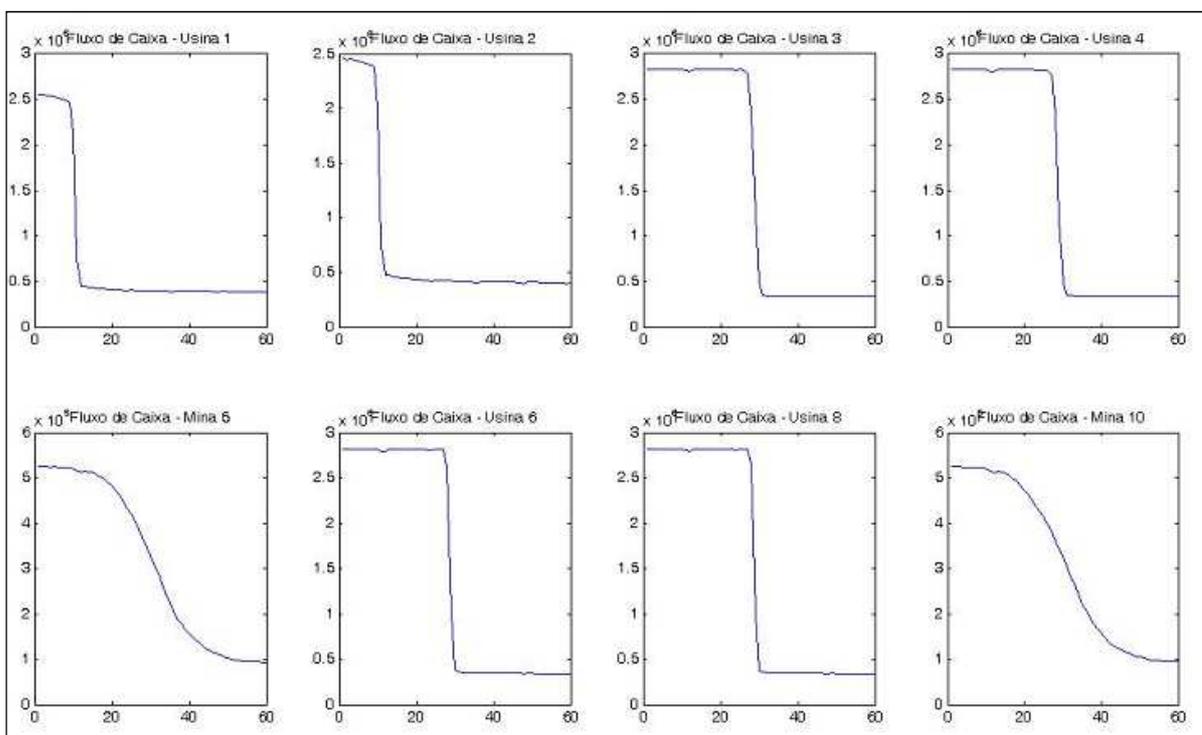


Figura 76: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 1

Podem ser visualizadas algumas mudanças de direção nos trechos dos gráficos dos agentes 3, 4, 6 e 8 em que o fluxo de caixa está em seu nível máximo. Tal fato se deve à súbita redução da produção para atendimento à Resolução CONAMA 357.

A figura 77 apresenta o fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.

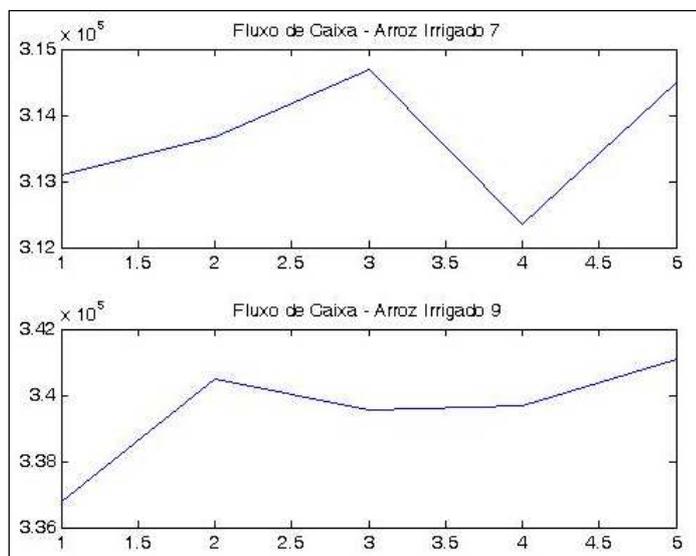


Figura 77: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso 1

A figura 78 apresenta o fluxo de caixa dos setores de mineração e de agricultura.

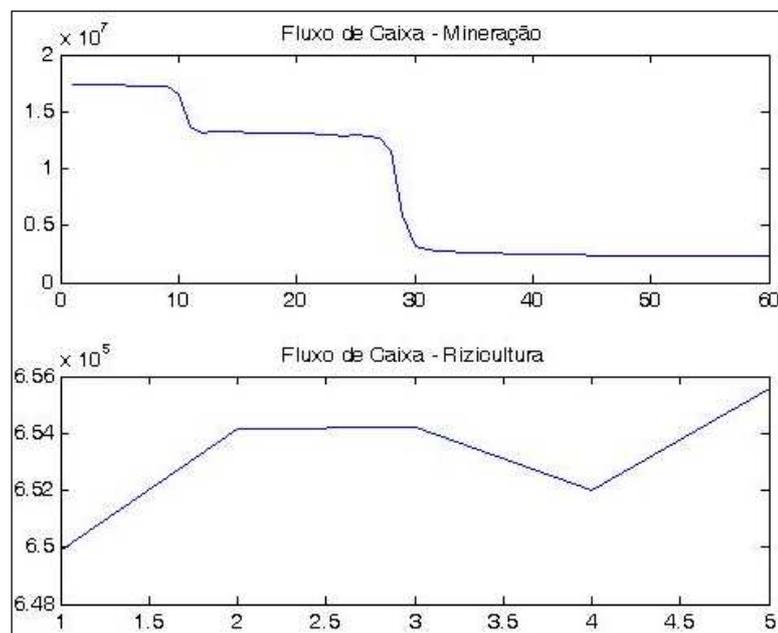


Figura 78: Fluxo de caixa setorial no caso 1

5.4.6 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade para o caso é realizada apenas a fim de verificar o comportamento da concentração de contaminantes face à produção mensal. As demais

variáveis apresentam padrões semelhantes àqueles descritos para o caso base. Ressalta-se que na verificação, adota-se a alocação ótima obtida na análise principal do caso.

Verificação única: Concentração de Contaminantes x Produção Mensal

A análise da concentração de contaminantes em função da produção mensal permite a determinação aproximada da tolerância da bacia hidrográfica às descargas de efluentes da mineração. Além disso, tal análise facilita o estabelecimento de condições para incremento no padrão de qualidade da bacia.

A primeira observação diz respeito às usinas de beneficiamento 1 e 2. Conforme já comentado, a localização de tais agentes não favorece a diluição dos efluentes no ponto de lançamento, já que ainda há pouca vazão dada a proximidade à nascente. A figura 79 apresenta a concentração de ferro na água alocada em função da produção mensal para as usinas de beneficiamento 1 e 2.

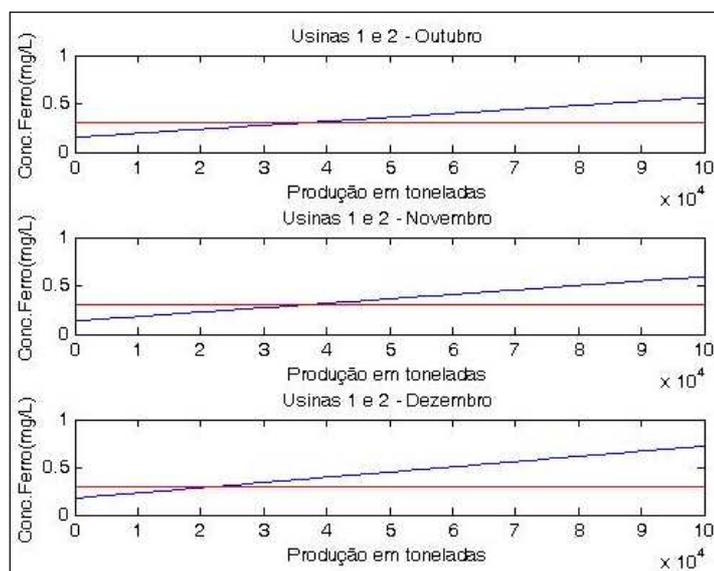


Figura 79: Conc. de Fe para as usinas 1 e 2 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso 1

As linhas vermelhas nos gráficos representam os limites de concentração de ferro para enquadramento na classe 1. Pode-se verificar que, com o tratamento adotado, o limite de concentração para enquadramento na classe 3 não é atingido e para enquadramento na classe 1, esse limite é violado ainda com baixas produções.

Dada a menor média histórica da vazão no mês de dezembro, o enquadramento das águas na classe 1 apenas ocorreria para produções inferiores a 20 mil toneladas por mês. No entanto, a ocorrência de vazões ainda menores que a média provocariam uma queda na produção para que o limite de concentração fosse respeitado.

A figura 80 apresenta a situação da concentração de ferro para as usinas 3, 4, 6 e 8.

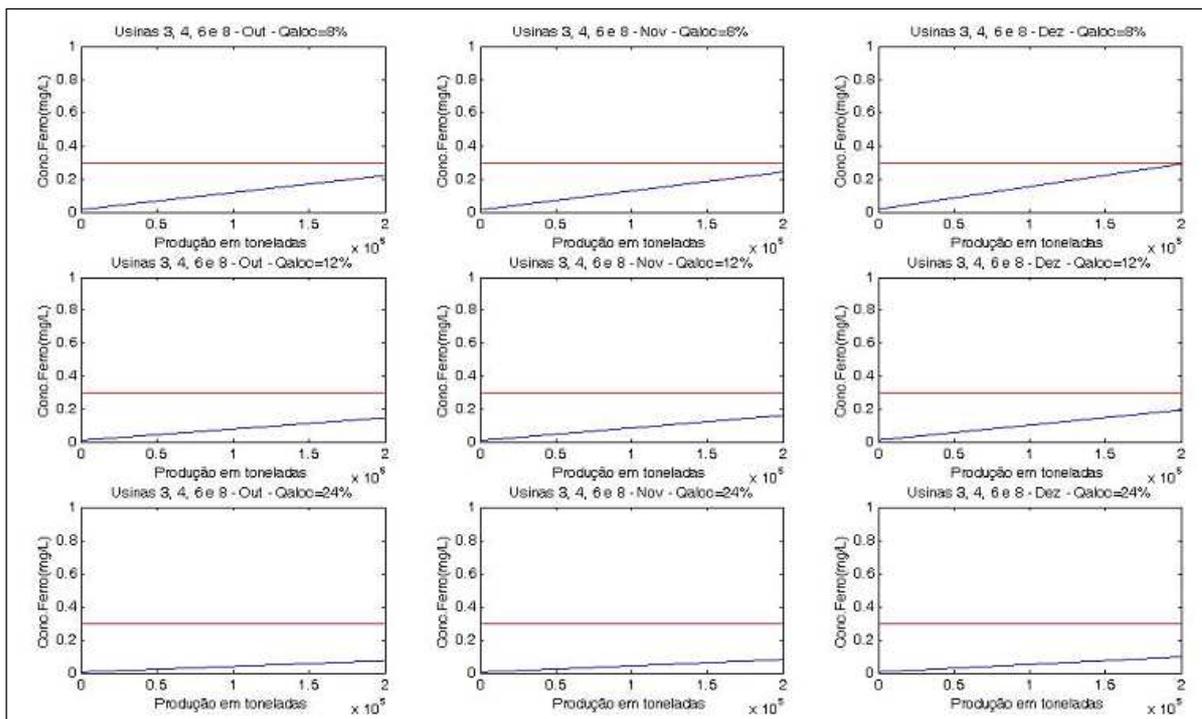


Figura 80: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso 1

A possibilidade de alocação de uma maior quantidade de água para as usinas 3, 4, 6 e 8 faz com que até mesmo o limite de concentração para enquadramento na classe 1 seja respeitado. Verifica-se que a alocação mínima de água para esses agentes, isto é, 8% da vazão disponível já é capaz de manter a qualidade da água em níveis aceitáveis para a classe 1 de uso. Ressalta-se que para a produção máxima considerada (200 mil toneladas) combinada com a alocação mínima no mês de dezembro leva a concentração a níveis muito próximos do limite, se considerada a vazão média histórica do mês.

A figura 81 apresenta as condições referentes às minas 5 e 10.

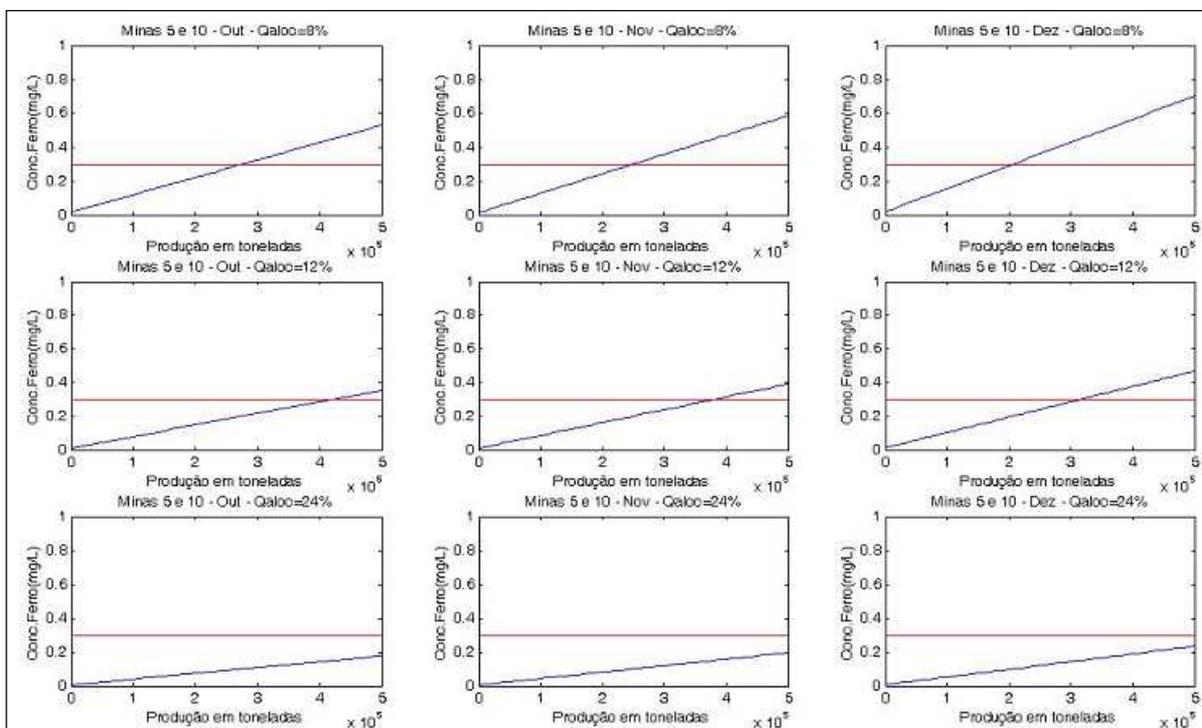


Figura 81: Concentração de ferro para as Minas 5 e 10 com $Q_{disp}=100\%Q_{exut}$ no caso 1

Da figura 81, pode-se concluir que o limite de enquadramento na classe 3 é respeitado, mesmo com a opção pelo tratamento passivo simples. O enquadramento na classe 1, entretanto, deve ser analisado com cautela. Percebe-se que, em caso de alocação máxima de recursos hídricos para estes agentes, isto é, 24% da vazão disponível, as águas poderiam ser enquadradas na classe 1 de uso. Porém, em nenhum dos casos analisados, esta alocação aparece como alocação ótima. Dessa forma, convém considerar necessária a elevação dos gastos com tratamento de efluentes, caso se decida enquadrar as águas da bacia na classe 1.

Por fim, destaca-se o fato de o limite de concentração para enquadramento na classe 3 ser respeitado de maneira confortável para todos os agentes. Entretanto, ressalta-se que foi considerada toda a vazão disponível para alocação entre empreendedores mineiros e agrícolas. A próxima análise, portanto, considera a destinação de 20% da vazão disponível para alocação para outros usos, além da mineração de carvão e cultura de arroz irrigado.

5.5 CASO 2: ENQUADRAMENTO NA CLASSE 3 COM 80% DA VAZÃO DISPONÍVEL

O caso 2 consiste na tentativa de enquadramento das águas da bacia na classe 3, reservando-se 20% da vazão do Rio Sangão para usos que não sejam a dissolução de efluentes da mineração e a irrigação de culturas de arroz.

Para isso, com fundamento nos resultados obtidos no caso base e no caso 1, o enquadramento na classe 3 com a reserva de 20% da vazão para outros usos ocorre com a imposição do tratamento ativo de efluentes para as usinas de beneficiamento 1 e 2 e do tratamento passivo simples para as demais usinas de beneficiamento. O tratamento passivo com lagoa anaeróbia foi a alternativa considerada para as minas 5 e 10.

Destaca-se que não há alocação de água para os agentes 1 e 2, já que o efluentes por eles gerados não possui carga de contaminantes. Assim, as alternativas de alocação ganham 0,5% da vazão cada uma (dada a disponibilização dos 4% anteriormente alocados para os agentes 1 e 2). São elas: 8,5%; 12,5% e 24,5%.

Todas as condições consideradas para os agentes agrícolas foram mantidas.

5.5.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos

A tabela 30 apresenta as formas mais frequentes de alocação nas otimizações.

Tabela 30: Alocação ótima de recursos hídricos no caso 2

Agente	Alocações ótimas		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Usina 1	0%	0%	0%
Usina 2	0%	0%	0%
Usina 3	8,5%	8,5%	8,5%
Usina 4	8,5%	8,5%	24,5%
Mina 5	8,5%	8,5%	8,5%
Usina 6	8,5%	24,5%	8,5%
Arroz irrigado 7	24,5%	8,5%	8,5%
Usina 8	8,5%	8,5%	8,5%
Arroz irrigado 9	24,5%	24,5%	24,5%
Mina 10	8,5%	8,5%	8,5%
FREQUÊNCIA	36,7632%	0,1099%	0,1099%

Assim como nos casos anteriores, a alocação ótima é aquela em que os agentes agrícolas recebem a maior parcela da vazão disponível. Tal fato tem a mesma explicação do caso anterior.

5.5.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido

Verifica-se que a função objetivo de maximização da renda total dos agentes instalados na bacia apresenta o valor médio de R\$ 72.202.992,45 com desvio padrão de R\$ 26.862.384,92. A tabela 31 relaciona os agentes instalados na bacia e os valores de média e desvio padrão do VPL de cada um.

Tabela 31: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 2

Agente	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Usina 1	3.590.437,85	1.428.256,77
Usina 2	3.590.551,95	1.430.665,53
Usina 3	7.485.539,29	2.813.501,14
Usina 4	7.474.984,33	2.810.433,98
Mina 5	16.379.875,92	6.916.764,56
Usina 6	7.477.911,99	2.809.903,12
Arroz irrigado 7	1.173.694,54	140.706,12
Usina 8	7.475.526,19	2.806.934,35
Arroz irrigado 9	1.258.785,47	154.745,14
Mina 10	16.295.684,91	6.989.863,12

A tabela 32 apresenta o Valor Presente Líquido para o agrupamento dos agentes por setor.

Tabela 32: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 2

Setor	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Mineração	69.770.512,43	26.840.654,86
Rizicultura	2.432.480,02	254.746,48
TOTAL	72.202.992,45	26.862.384,92

A figura 82 apresenta o VPL obtido em cada simulação para cada um dos agentes mineiros instalados na bacia.

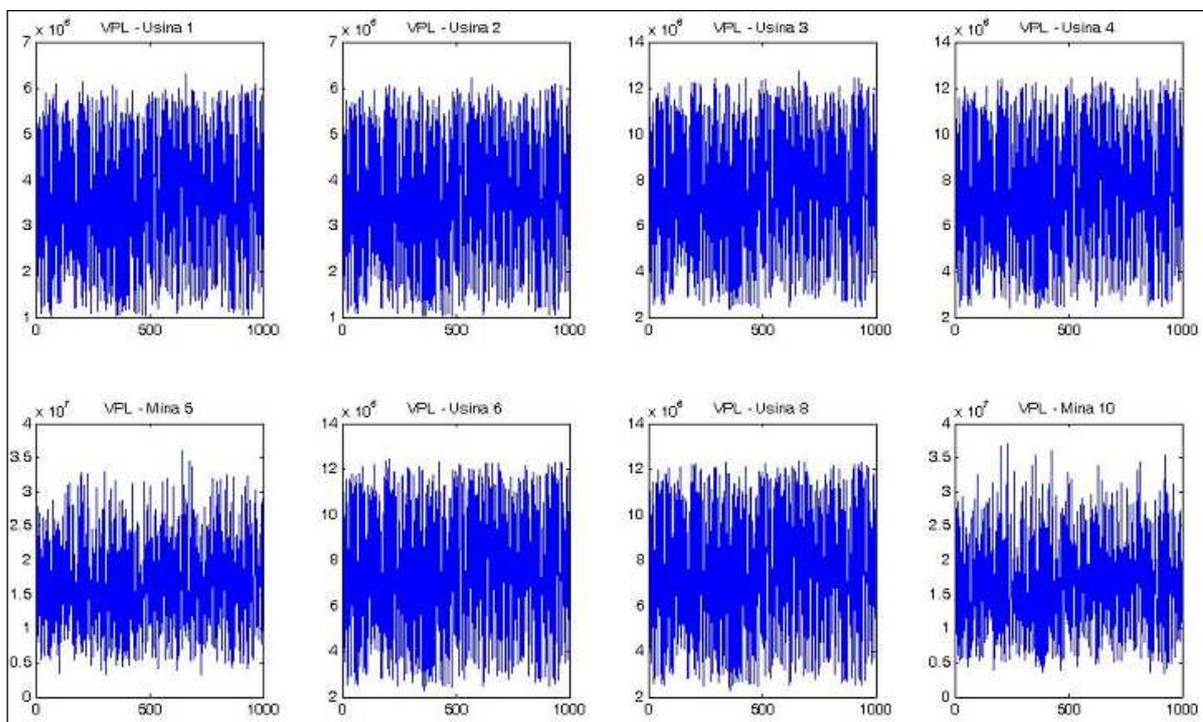


Figura 82: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 2

Pode-se constatar que as Usinas de Beneficiamento 1 e 2 variam seus respectivos VPL entre, aproximadamente, R\$ 1,0 milhões e R\$ 6,0 milhões. As Usinas 3, 4, 6 e 8 têm VPL variando entre, aproximadamente, R\$ 2,0 milhões e R\$ 12,5 milhões. Por fim, as Minas 5 e 10 variam o VPL entre R\$ 5 milhões e R\$ 35 milhões, aproximadamente. Com maiores gastos de tratamento, observa-se uma maior redução do VPL em relação ao caso base.

A figura 83 mostra os histogramas dos agentes mineiros instalados na bacia.

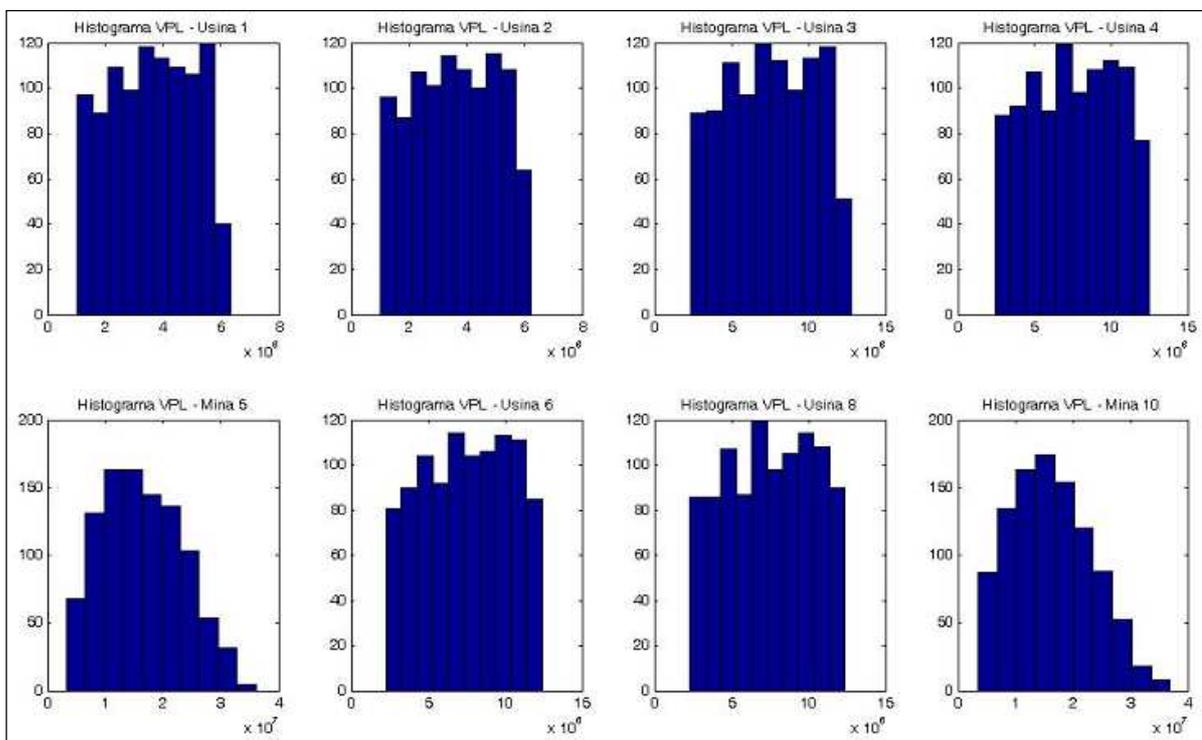


Figura 83: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 2

O comportamento estocástico do VPL dos agentes mineiros é semelhante ao apresentado no caso anterior, isto é, um padrão com certa uniformidade (excetuando-se os valores máximos) para as usinas de beneficiamento e um padrão assimétrico com maior probabilidade para valores próximos aos mínimos para as minas subterrâneas.

A figura 84 traz o VPL dos agentes agrícolas para cada simulação executada.

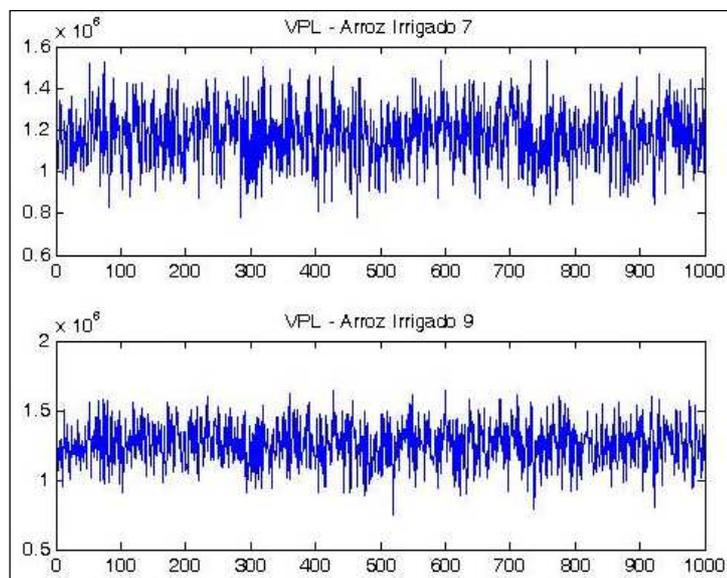


Figura 84: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 2

Verifica-se que o agente 7 apresenta VPL variando entre, aproximadamente R\$ 800 mil e R\$ 1,4 milhão. O agente 9 varia seu VPL de, aproximadamente R\$ 1,0 milhão a R\$ 1,5 milhão. A figura 85 traz os histogramas dos agentes 7 e 9.

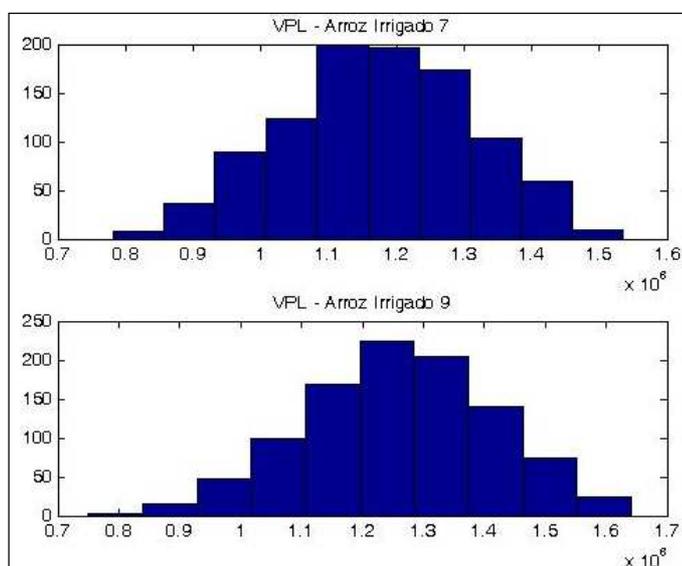


Figura 85: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 2

Assim como nos casos anteriores, para os agentes agrícolas, pode-se admitir que os valores médios são aqueles que ocorrem com maior frequência nas simulações. Em quase 45% das ocorrências, o VPL do agente 7 se situa entre R\$ 1,1 milhão e R\$ 1,3 milhão. Para o

agente 9, aproximadamente 48% das ocorrências tiveram como resultado o VPL entre R\$ 1,2 milhão e R\$ 1,4 milhão. A figura 86 apresenta a variabilidade do VPL por setor e o total da bacia.

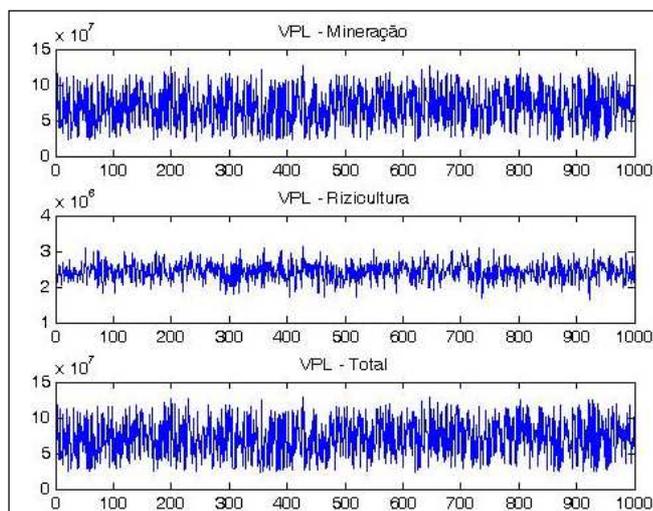


Figura 86: Comportamento do VPL por setor no caso 2

Verifica-se a variação do VPL do setor mineral e da bacia entre R\$ 35 milhões e 125 milhões. A variação de VPL do setor agrícola se situa entre R\$ 2,0 milhões e R\$ 3,0 milhões.

A figura 87 apresenta os histogramas do VPL por setor e o total da bacia.

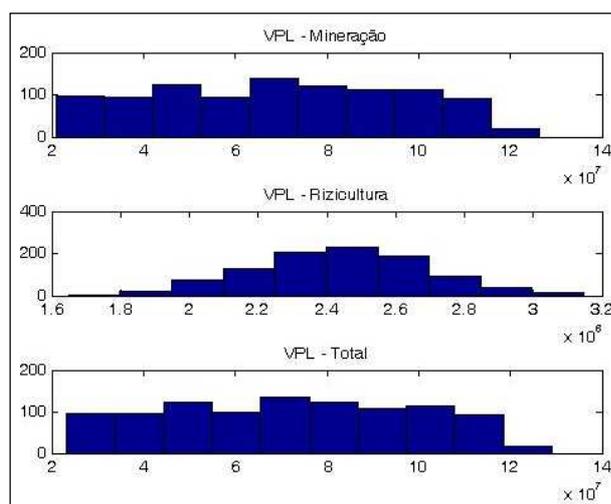


Figura 87: Histograma dos VPL por setor no caso 2

Portanto, pode-se dizer que os valores máximos de VPL têm menor possibilidade de ocorrência tanto para a mineração quanto para o total da bacia. Em paralelo, o setor agrícola tem menor probabilidade de gerar valores extremos, tanto máximos quanto mínimos.

5.5.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais

A figura 88 apresenta o comportamento da produção de carvão mineral pelas minas e pelas usinas de beneficiamento ao longo do horizonte de 60 meses de planejamento.

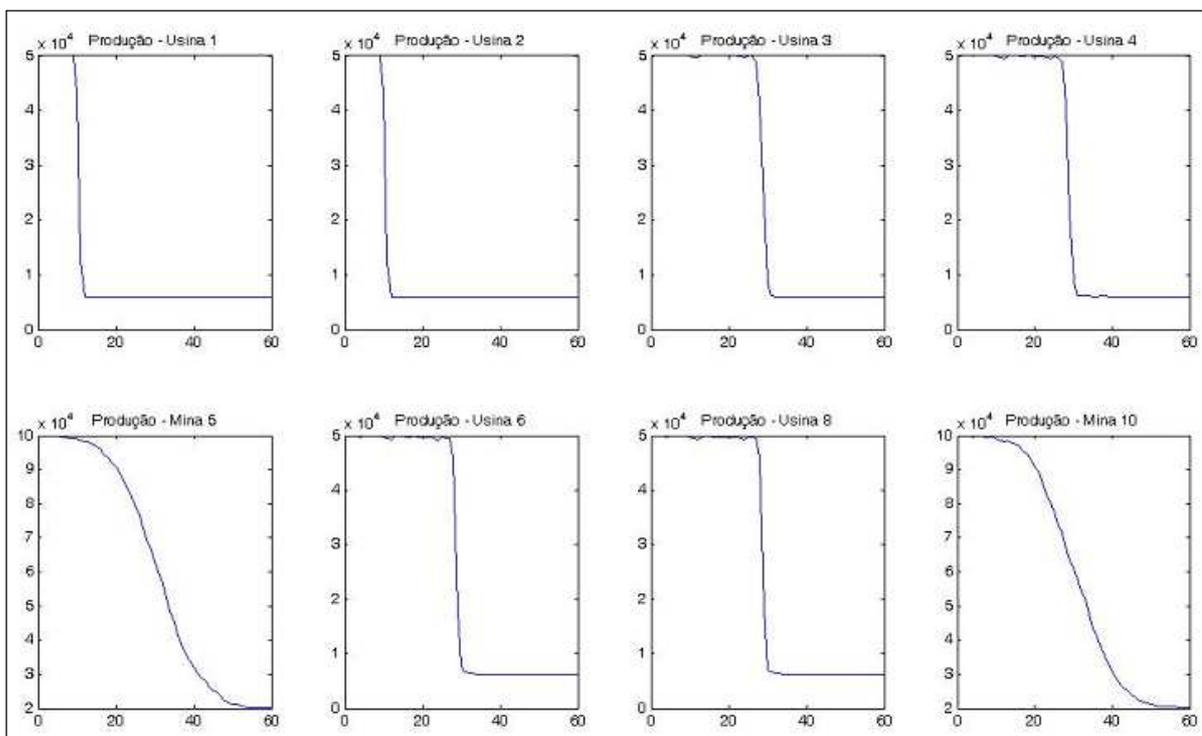


Figura 88: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 2

Pode-se perceber que, excetuando-se as usinas 1 e 2, os agentes mineiros apresentam alguma dificuldade em manter a produção em níveis elevados. Tal dificuldade é menor para as minas 5 e 10, tendo em vista a utilização de tratamento mais eficiente nestes agentes. Os demais mostram quedas maiores de produção durante o período de produção máxima.

A figura 89 apresenta a evolução da produção de arroz no período considerado.

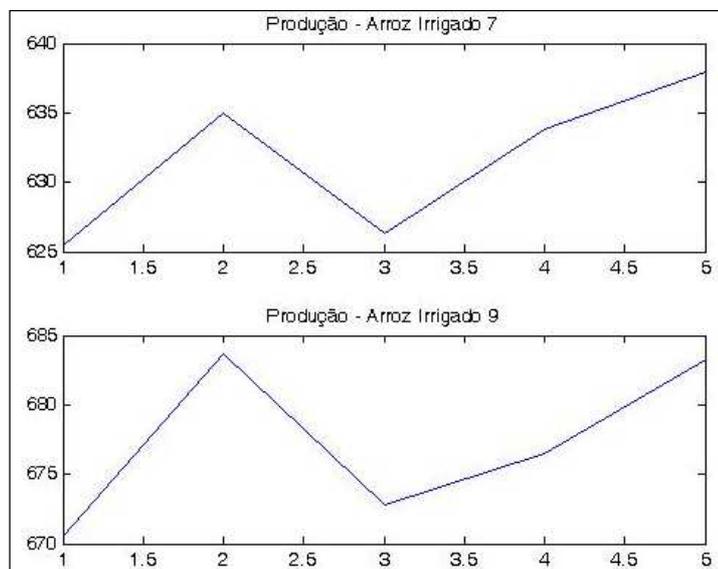


Figura 89: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 2

A desconsideração dos efeitos da concentração de contaminantes na produtividade agrícola não permite diferenças significativas de produção em relação ao caso base.

5.5.4 Comportamento da Qualidade da Água

A figura 90 apresenta o comportamento da concentração de ferro na água alocada para cada um dos agentes mineiros.

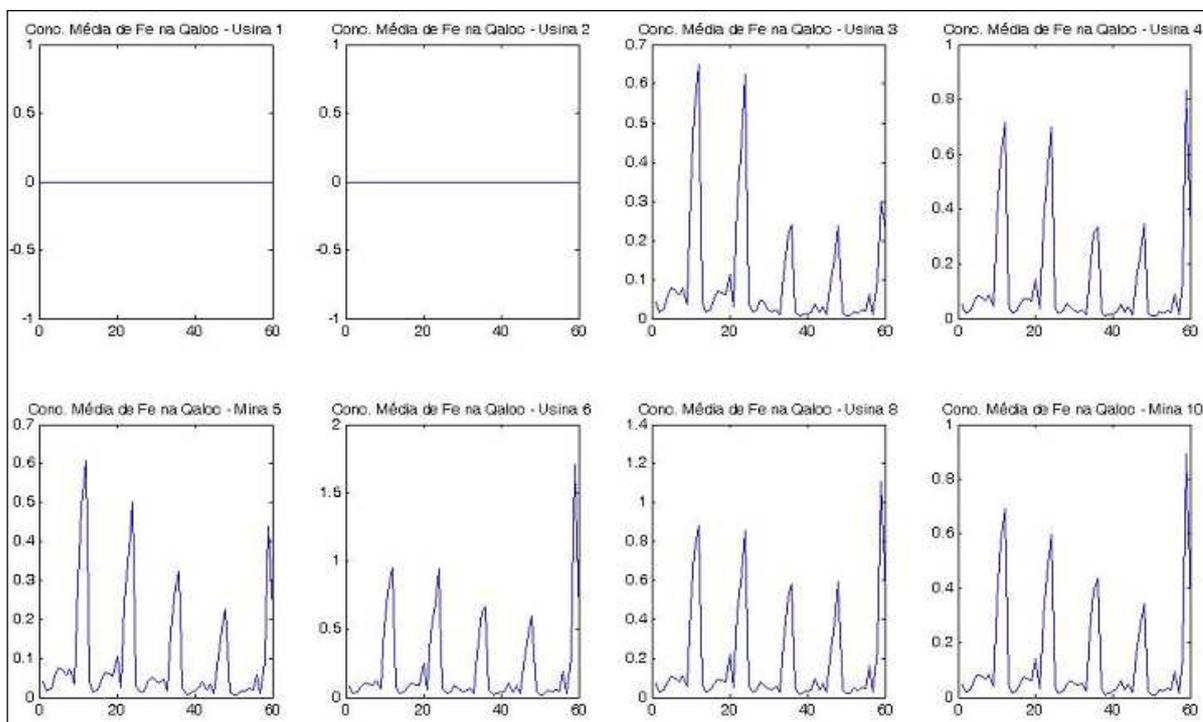


Figura 90: Conc. média de Fe na água alocada para os agentes mineiros no caso 2

Com exceção do agente 6, pode-se dizer que a concentração de ferro na água alocada para os agentes mineiros se situa em valores inferiores a 1,0 mg/L. Destaca-se a concentração de ferro dos agentes 1 e 2 em níveis nulos, dada a opção pelo tratamento ativo nesse caso.

Para os demais contaminantes, a concentração se comporta de maneira semelhante. A figura 91 apresenta a concentração média de sulfatos.

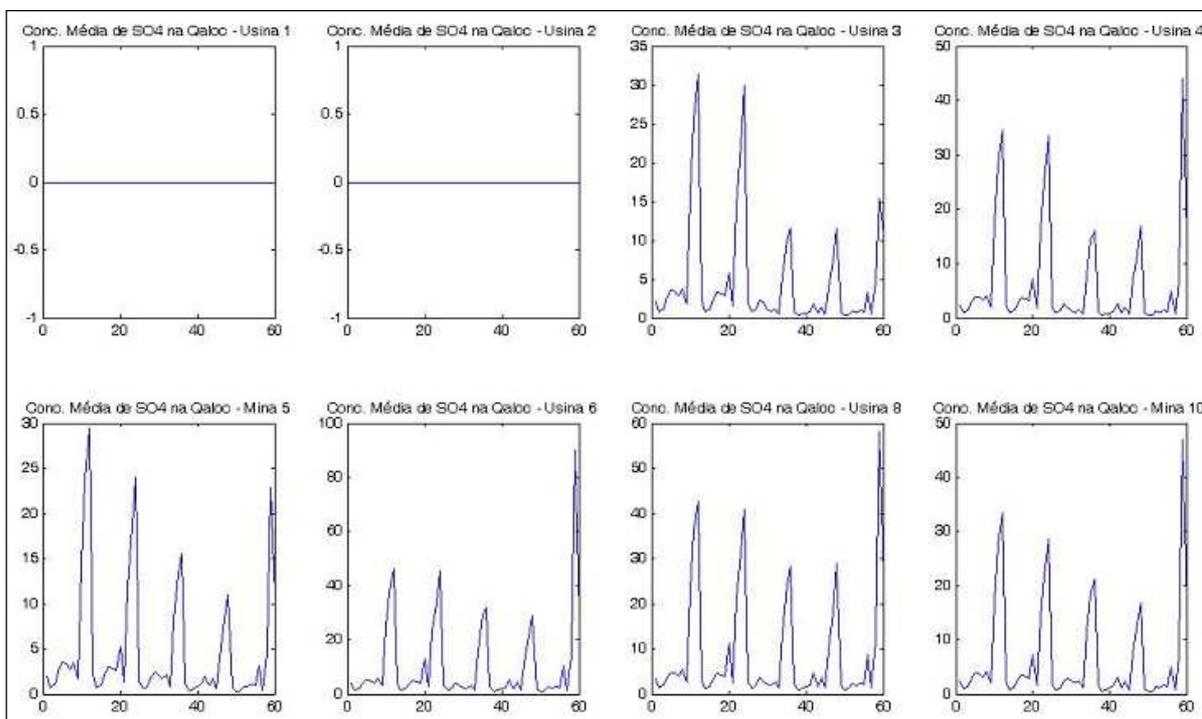


Figura 91: Conc. média de SO_4 na água alocada para os agentes mineiros no caso 2

A concentração de manganês comporta-se no tempo conforme figura 92.

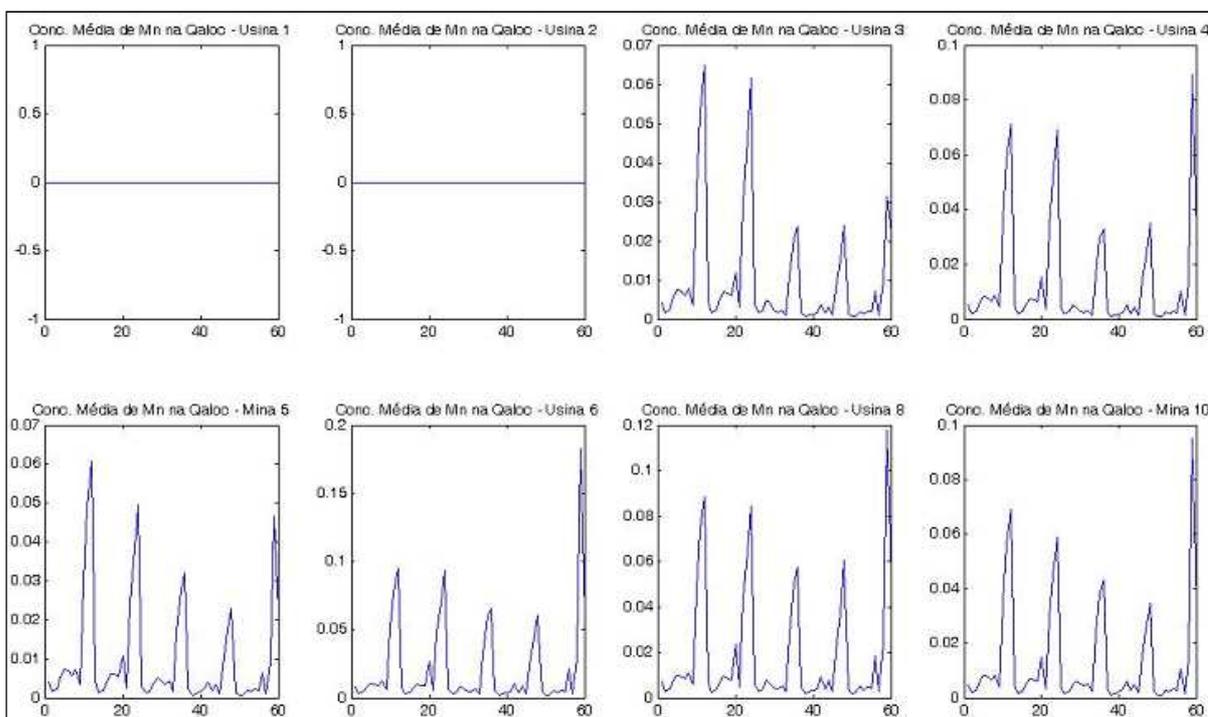


Figura 92: Conc. média de Mn na água alocada para os agentes mineiros no caso 2

A figura 93 apresenta as concentrações de ferro nos pontos de monitoramento do Rio Sangão.

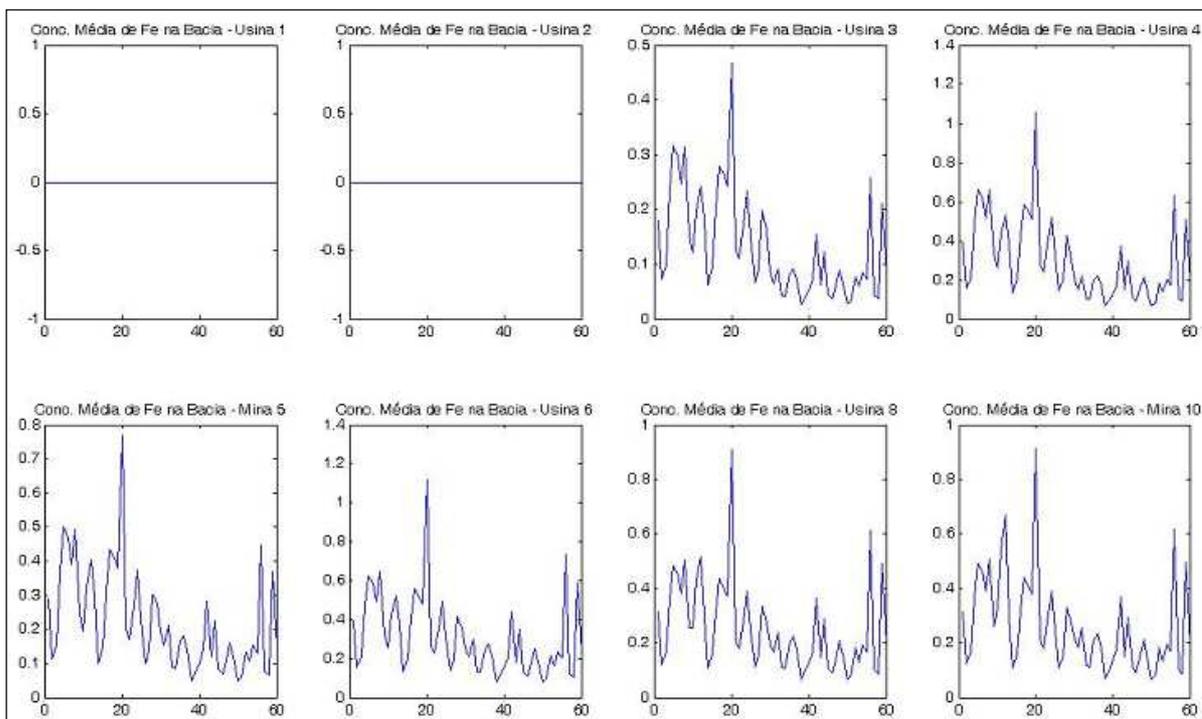


Figura 93: Conc. média de Fe nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2

Verifica-se que durante todo o período considerado a concentração de contaminantes nos pontos de monitoramento se situa dentro do que a Resolução CONAMA 357 permite para enquadramento na Classe 3. Apenas a usina de beneficiamento 3 atenderia a exigência de 0,3 mg/L de ferro para enquadramento na classe 1. Se tal enquadramento fosse solicitado, o tratamento de efluentes escolhido para os agentes deveria ser mais rigoroso.

A figura 94 mostra a concentração de ferro nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

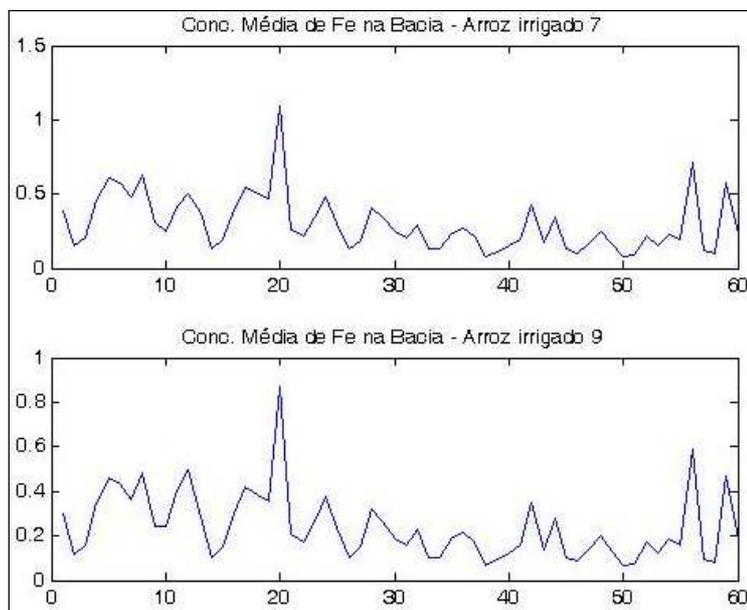


Figura 94: Conc. média de Fe nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2

Destaca-se que, apesar do enquadramento no limite legal, são desconsiderados os efeitos das concentrações obtidas na produtividade da cultura.

Os demais contaminantes considerados no presente estudo apresentam comportamento semelhante. A figura 95 apresenta a concentração de sulfatos nos pontos de monitoramento do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

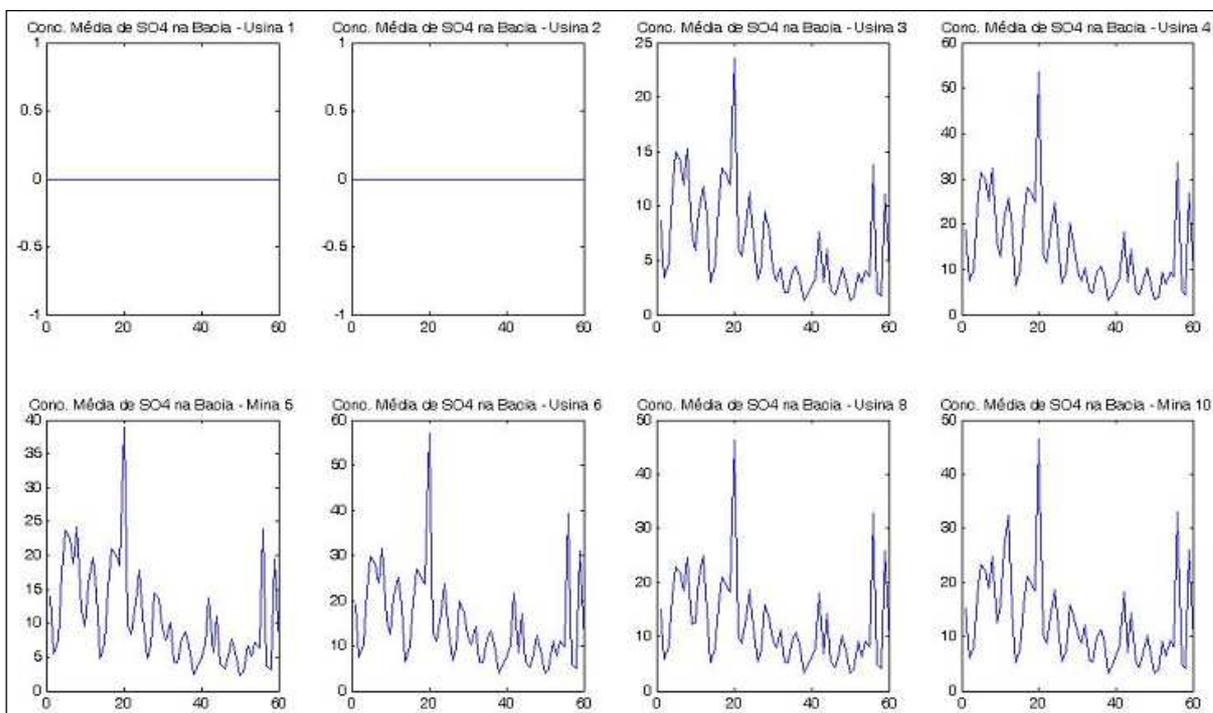


Figura 95: Conc. média de SO_4 nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2

A figura 96 mostra a concentração de sulfatos nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

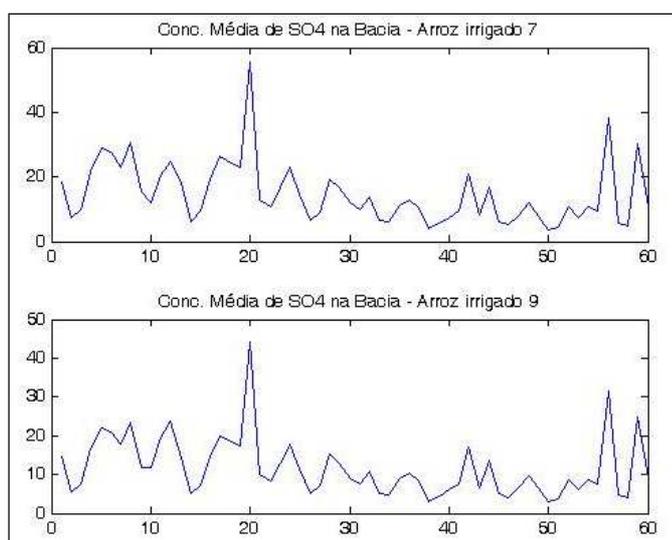


Figura 96: Conc. média de SO_4 nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2

A figura 97 apresenta a concentração de manganês nos pontos do Rio Sangão onde os despejos de cada agente mineiro são considerados.

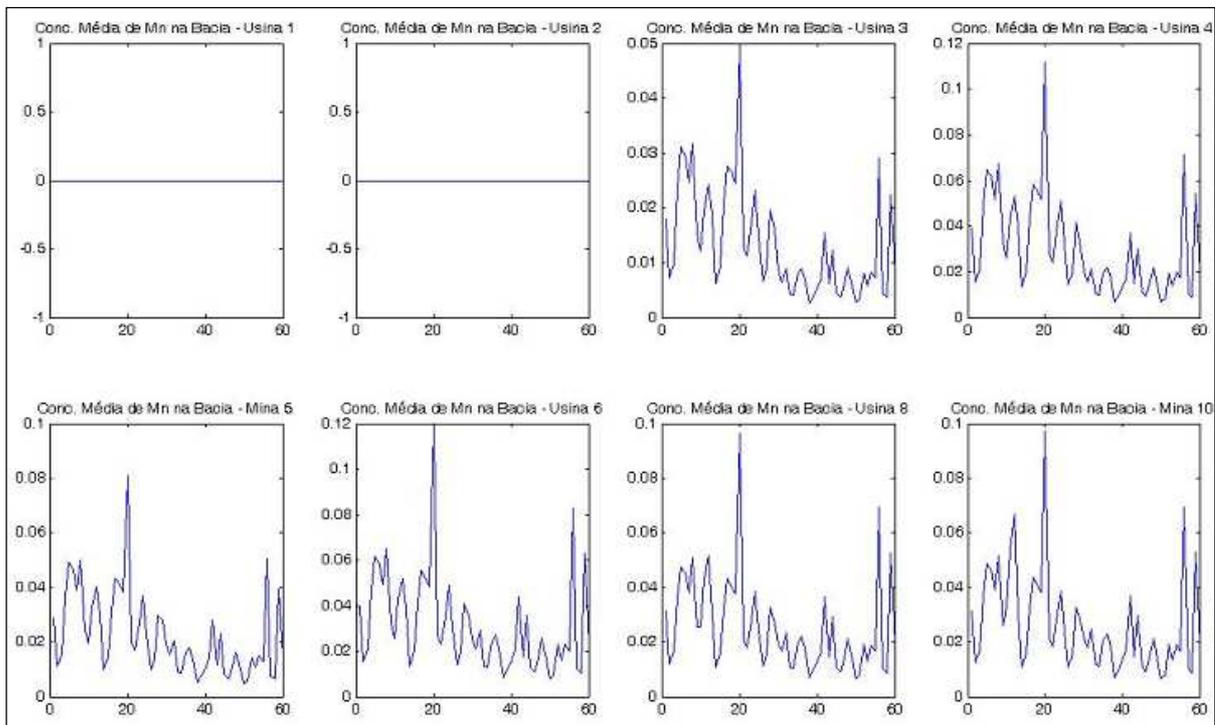


Figura 97: Conc. média de Mn nos pontos de monitoramento do Rio Sangão no caso 2

A figura 98 mostra a concentração de manganês nos pontos de captação das áreas de cultivo de arroz irrigado.

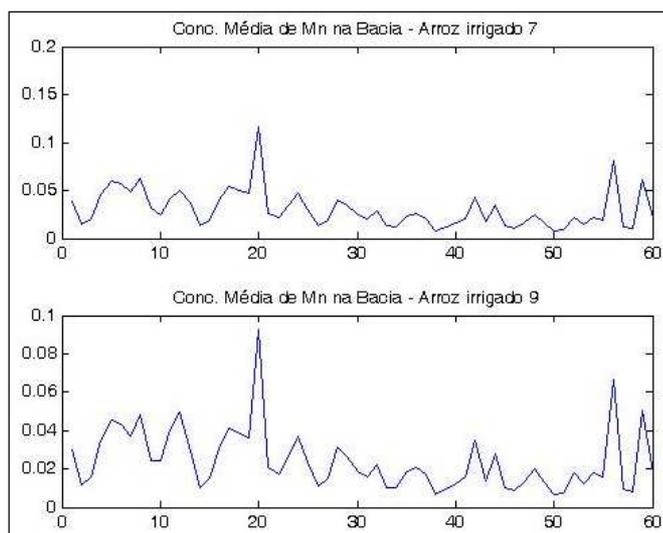


Figura 98: Conc. média de Mn nos pontos de captação de água para irrigação no caso 2

Por fim, verifica-se o comportamento da concentração dos contaminantes considerados no exutório da bacia. A figura 99 ilustra a questão.

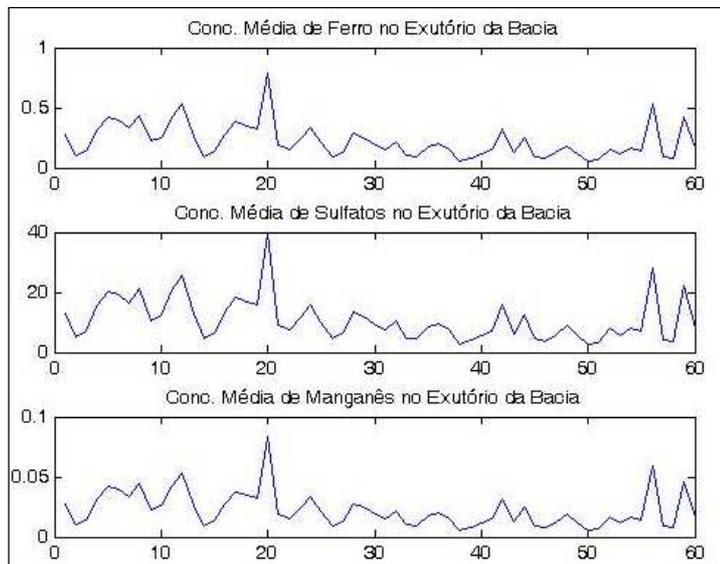


Figura 99: Concentração média de contaminantes no exutório da bacia no caso 2

Constata-se que os limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357 para enquadramento na Classe 3 são respeitados, mesmo com a reserva de 20% da vazão para outros usos.

5.5.5 Comportamento do Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa dos agentes se comporta de forma semelhante à produção dos respectivos recursos naturais, mostrando até mesmo a redução do fluxo em períodos de produção máxima para atendimento aos limites impostos pela Resolução CONAMA 357. A figura 100 apresenta o fluxo de caixa dos agentes mineiros.

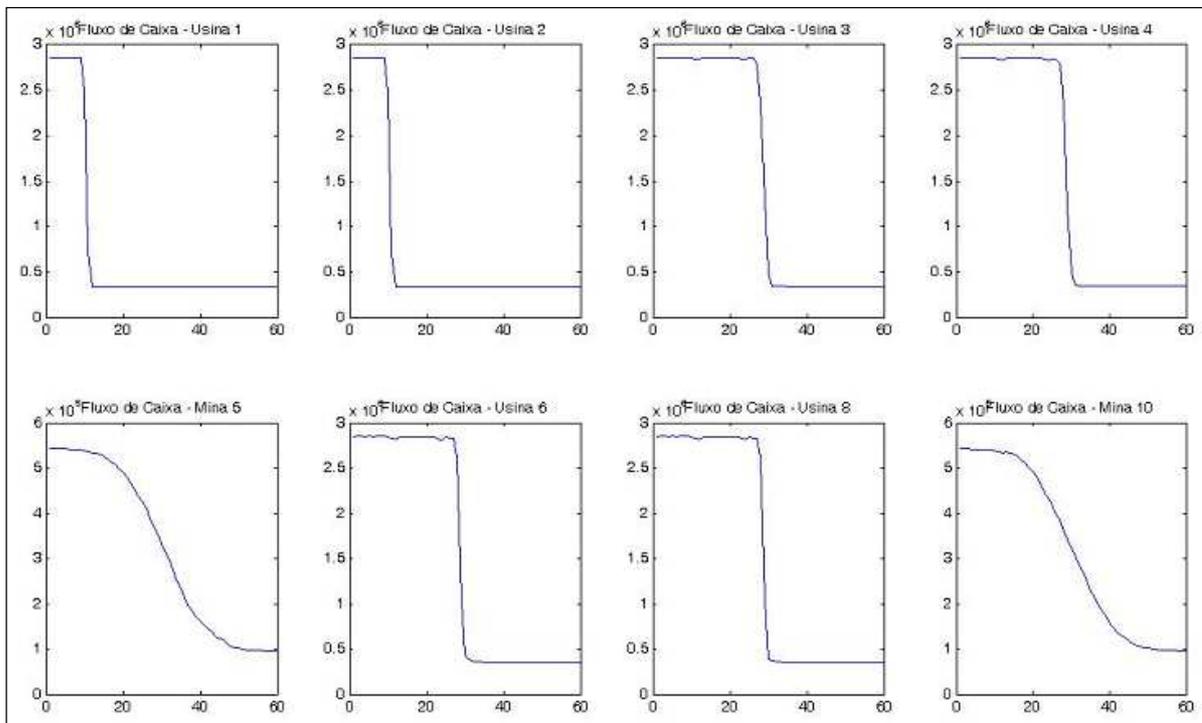


Figura 100: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 2

A figura 101 apresenta o fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.

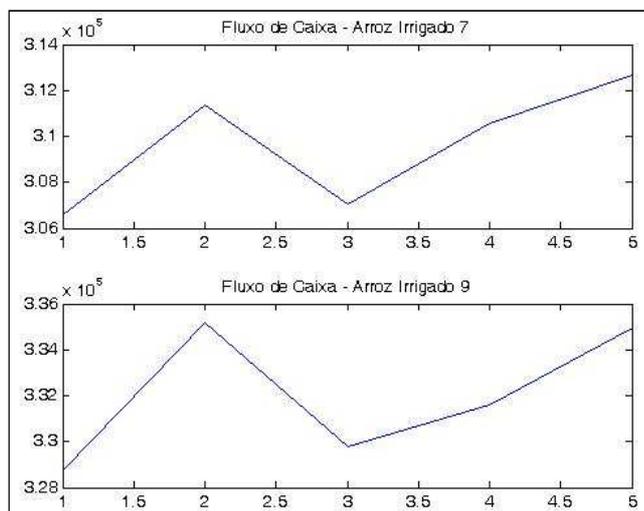


Figura 101: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.

A figura 102 apresenta o fluxo de caixa dos setores de mineração e de agricultura.

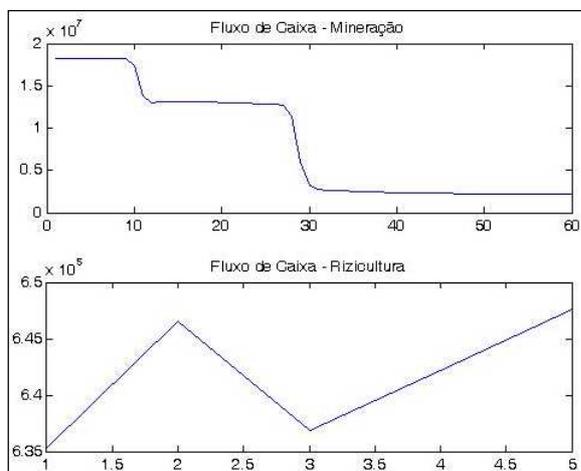


Figura 102: Fluxo de caixa setorial no caso 2

5.5.6 Análise de Sensibilidade

Do mesmo modo que no caso 1, a análise de sensibilidade para o caso 2 é realizada apenas em relação ao comportamento da concentração de contaminantes com variação da produção mensal. As demais variáveis apresentam padrões semelhantes àqueles descritos para o caso base. Ressalta-se que na verificação, adota-se a alocação ótima obtida na análise principal do caso.

Verificação única: Concentração de Contaminantes x Produção Mensal

Por apresentar valores nulos, o gráfico da concentração de contaminantes em função da produção mensal das usinas de beneficiamento 1 e 2 não é mostrado nesta verificação. A figura 103 apresenta a situação da concentração de ferro para as usinas 3, 4, 6 e 8.

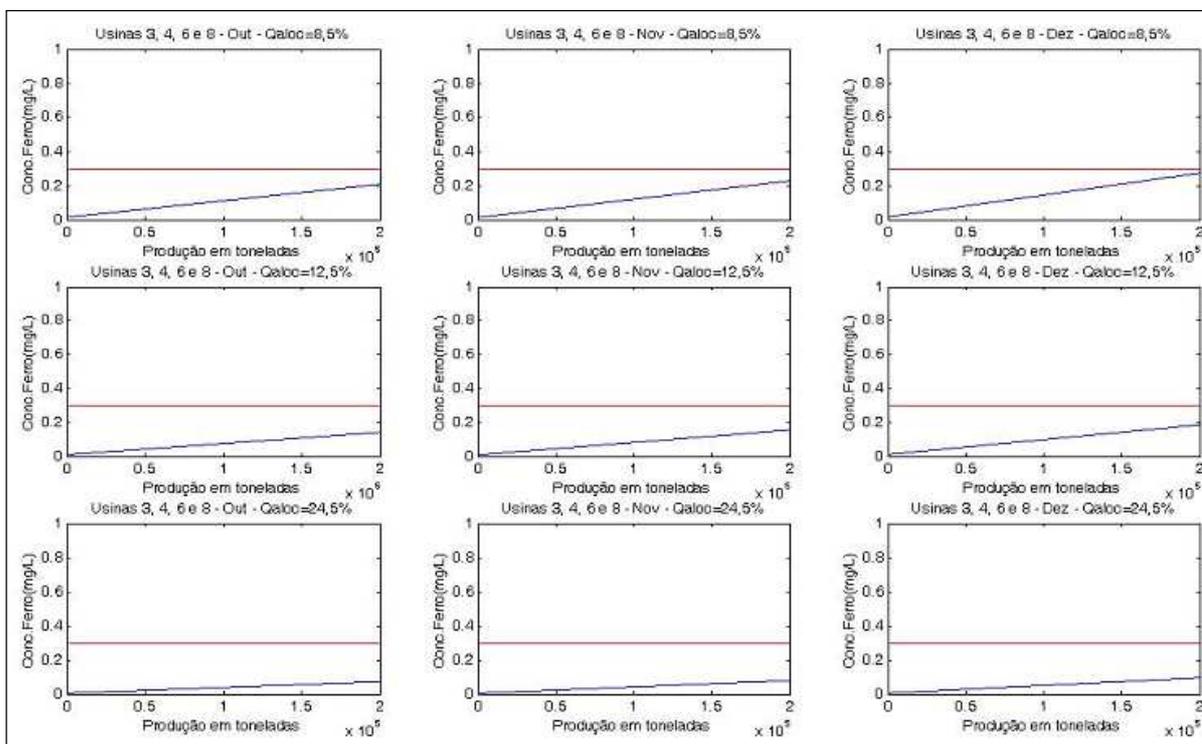


Figura 103: Conc. de Fe para as usinas 3, 4, 6 e 8 com $Q_{disp}=80\%Q_{exut}$ no caso 2

As linhas vermelhas nos gráficos representam os limites de concentração de ferro para enquadramento na classe 1. Pode-se verificar que, com o tratamento adotado, o limite de concentração para enquadramento na classe 3 não é atingido e para enquadramento na classe 1, esse limite é atingido, sem ser superado, apenas em níveis próximos à produção máxima no mês de dezembro, considerada a alocação mínima para os agentes.

No entanto, dada a ocorrência de vazões inferiores à média histórica, convém que a adoção da classe 1 de uso das águas seja acompanhada de um incremento no padrão de tratamento dos efluentes mineiros.

A figura 104 apresenta as condições referentes às minas 5 e 10.

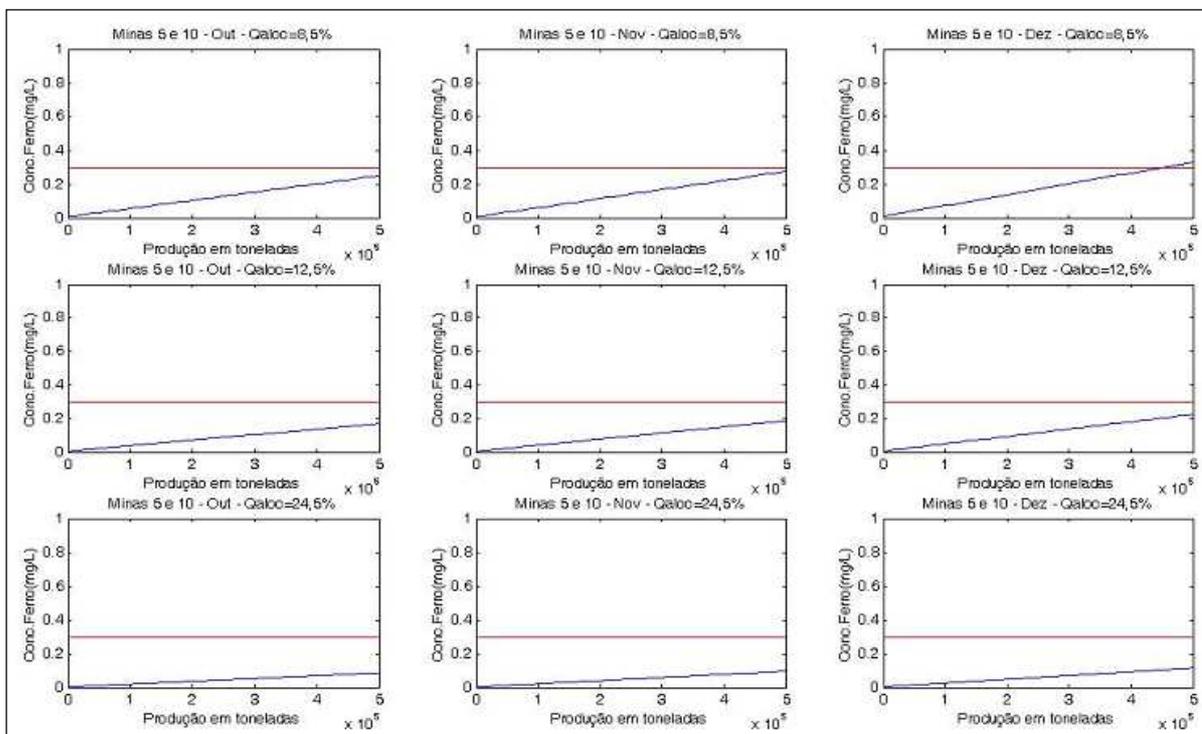


Figura 104: Conc. de Fe para as Minas 5 e 10 com $Q_{disp}=80\%Q_{exut}$ no caso 2

Da figura 103, pode-se concluir que o limite de enquadramento na classe 3 é respeitado, dada a opção pelo tratamento passivo com lagoa anaeróbia. O enquadramento na classe 1, entretanto, fica comprometido para níveis altos de produção com alocação mínima nos meses de novembro e de dezembro.

5.6 CASO 3: IMPOSIÇÃO DO TRATAMENTO ATIVO DE EFLUENTES À MINERAÇÃO

O caso 3 consiste na imposição do tratamento ativo de efluentes a todos os agentes mineiros. Ressalta-se que o tratamento ativo praticamente anula a concentração de metais, já que consiste na adição de substâncias com pH baixo o suficiente para neutralizar a acidez do efluente. Com pH próximo ao nível neutro, os metais decantam e podem ser retirados.

O enquadramento das águas da bacia, neste caso, pode ser a classe 1 de uso, tendo em vista que a descarga de contaminantes das atividades mineiras fica próxima de zero.

Consideram-se as mesmas alternativas de alocação de água que no caso base, ou seja, 8%, 12% e 24%; ainda que, com o tratamento ativo, os agentes mineiros não tenham mais necessidade de água para dissolução de efluentes. O procedimento tem como objetivo evitar que toda a água possa ser alocada para a agricultura e, assim, verificar o comportamento do VPL em função da área cultivada de que se dispõe atualmente na região.

Todas as demais condições consideradas para os agentes agrícolas foram mantidas.

5.6.1 Alocação Ótima de Recursos Hídricos

A tabela 33 apresenta as formas mais frequentes de alocação nas otimizações.

Tabela 33: Alocação de recursos hídricos no caso 3

Agente	Alocações		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Usina 1	2%	2%	2%
Usina 2	2%	2%	2%
Usina 3	8%	8%	8%
Usina 4	8%	8%	8%
Mina 5	8%	8%	8%
Usina 6	8%	8%	8%
Arroz irrigado 7	24%	24%	12%
Usina 8	8%	8%	8%
Arroz irrigado 9	24%	12%	24%
Mina 10	8%	8%	8%
FREQUÊNCIA	29,0709%	17,0829%	16,6833%

Assim como nos casos anteriores, a alocação ótima é aquela em que os agentes agrícolas recebem a maior parcela da vazão disponível. Tal fato decorre da falta de necessidade de alocação de água para diluição dos efluentes mineiros.

5.6.2 Comportamento Estocástico do Valor Presente Líquido

Verifica-se que a função objetivo de maximização da renda total dos agentes instalados na bacia apresenta o valor médio de R\$ 66.527.906,76 com desvio padrão de R\$ 26.720.462,59.

A tabela 34 relaciona os agentes instalados na bacia e os valores de média e desvio padrão do VPL de cada um.

Tabela 34: VPL – média e desvio padrão para cada agente no caso 3

Agente	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Usina 1	3.451.156,17	1.419.805,06
Usina 2	3.451.346,80	1.422.539,28
Usina 3	6.794.663,00	2.799.903,20
Usina 4	6.789.487,77	2.805.846,25
Mina 5	15.035.223,18	6.820.859,42
Usina 6	6.788.844,40	2.795.753,52
Arroz irrigado 7	1.193.344,28	138.718,09
Usina 8	6.790.980,59	2.795.484,76
Arroz irrigado 9	1.291.138,24	147.028,87
Mina 10	14.941.722,32	6.821.762,71

A tabela 35 apresenta o Valor Presente Líquido para o agrupamento dos agentes por setor.

Tabela 35: VPL – média e desvio padrão por setor no caso 3

Setor	Valor Presente Líquido (R\$)	
	Média	Desvio padrão
Mineração	64.043.424,24	26.703.942,39
Rizicultura	2.484.482,52	248.959,40
TOTAL	66.527.906,76	26.720.462,59

A figura 105 apresenta o VPL obtido em cada simulação para cada um dos agentes mineiros instalados na bacia.

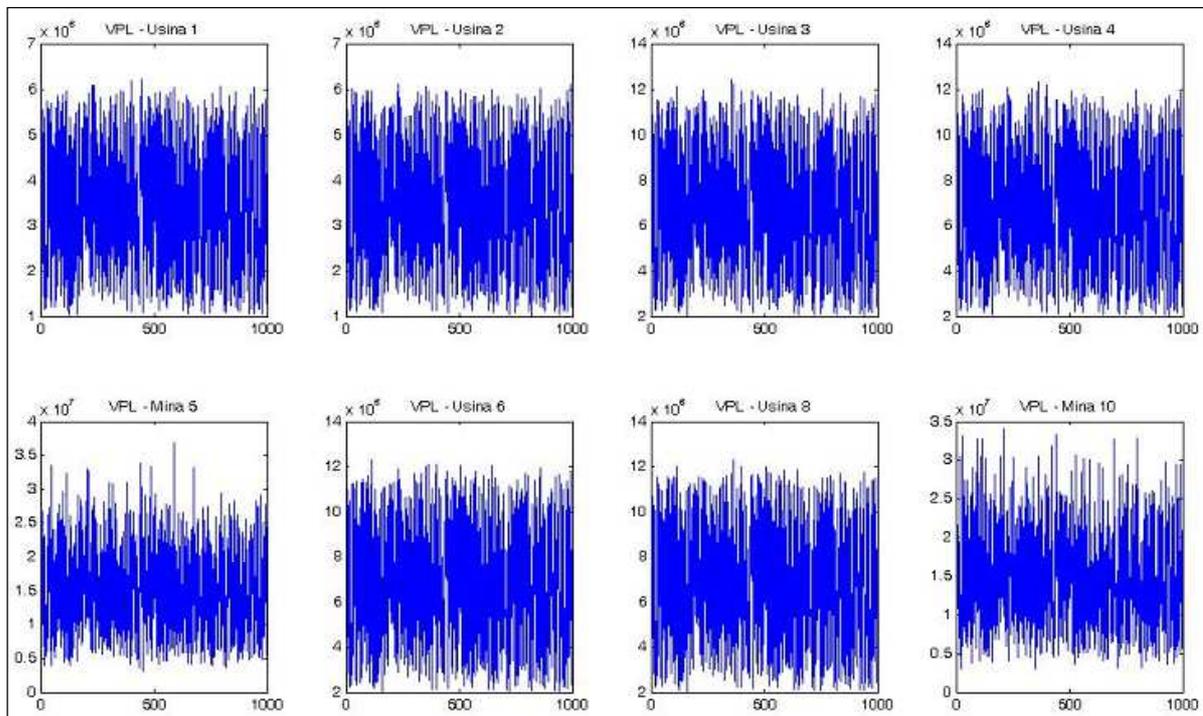


Figura 105: Comportamento do VPL para os agentes mineiros no caso 3

Pode-se constatar que as Usinas de Beneficiamento 1 e 2 variam seus respectivos VPL entre, aproximadamente, R\$ 1,0 milhões e R\$ 6,0 milhões. As Usinas 3, 4, 6 e 8 têm VPL variando entre, aproximadamente, R\$ 2,0 milhões e R\$ 12,0 milhões. Por fim, as Minas 5 e 10 variam o VPL entre R\$ 5 milhões e R\$ 30 milhões, aproximadamente.

A figura 106 mostra os histogramas dos agentes mineiros instalados na bacia.

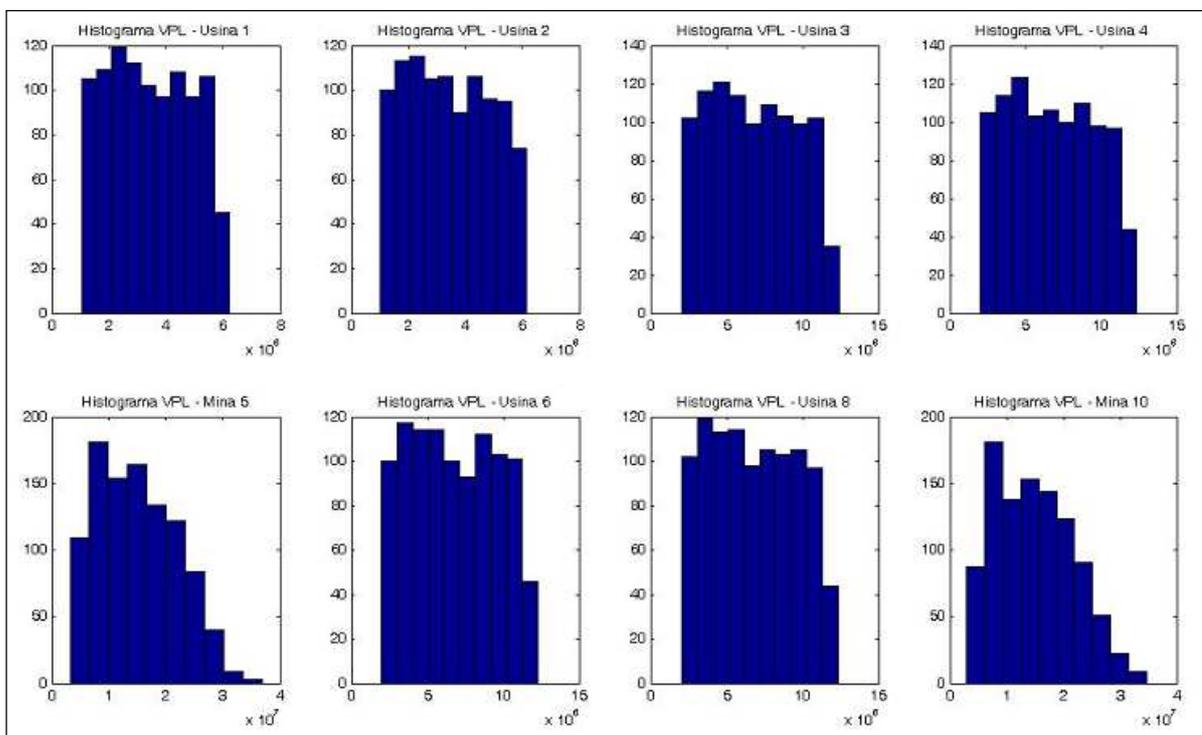


Figura 106: Histograma dos VPL para os agentes mineiros no caso 3

O comportamento estocástico do VPL dos agentes mineiros é semelhante ao apresentado nos casos anteriores.

A figura 107 traz o VPL dos agentes agrícolas para cada simulação executada.

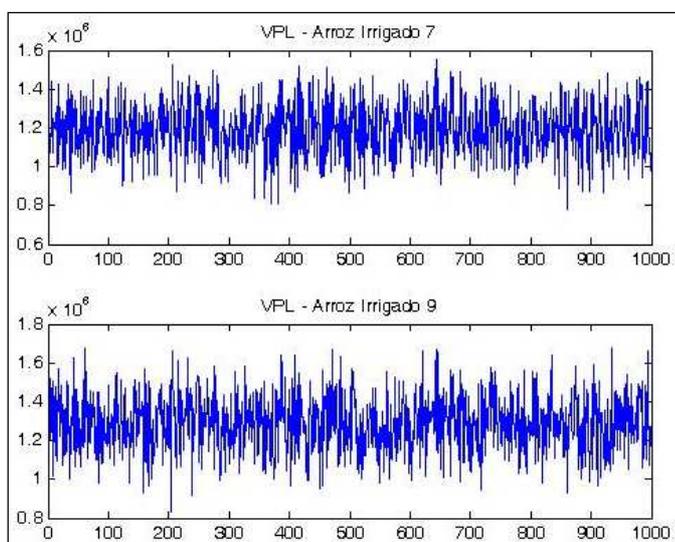


Figura 107: Comportamento do VPL para os agentes agrícolas no caso 3

Verifica-se que o agente 7 apresenta VPL que varia entre, aproximadamente R\$ 800 mil e R\$ 1,4 milhão. O agente 9 varia seu VPL de, aproximadamente R\$ 1,0 milhão a R\$ 1,6 milhão. A figura 108 traz os histogramas dos agentes 7 e 9.

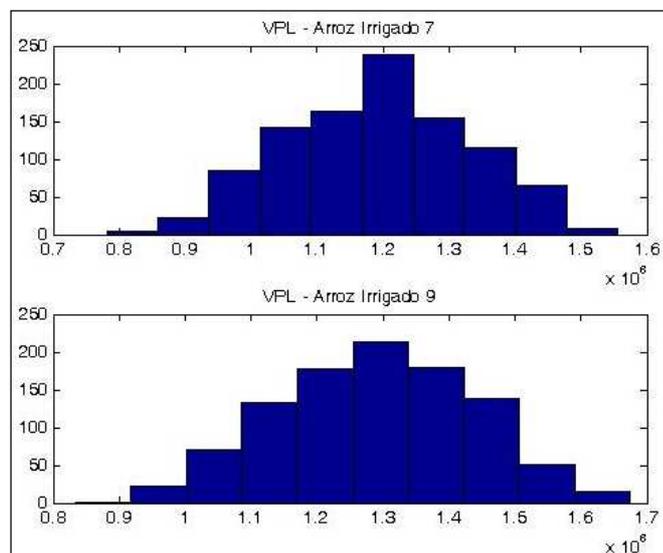


Figura 108: Histograma dos VPL para os agentes agrícolas no caso 3

Pode-se concluir que em mais da metade dos casos, o VPL se situa entre R\$ 1,1 milhão e R\$ 1,3 milhão para o agente 7 e para o agente 9 na faixa que vai de R\$ 1,2 milhão até R\$ 1,4 milhão.

A figura 109 apresenta a variabilidade do VPL por setor e o total da bacia.

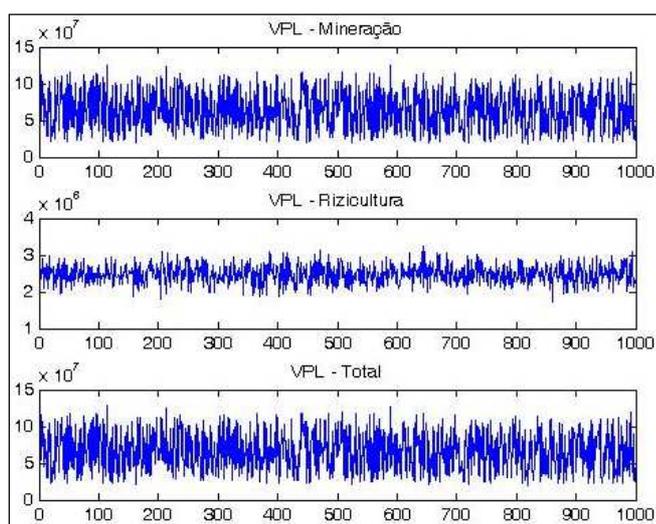


Figura 109: Comportamento do VPL por setor no caso 3

Verifica-se a variação do VPL do setor mineral e da bacia entre R\$ 35 milhões e 125 milhões. A variação de VPL do setor agrícola se situa entre R\$ 2,0 milhões e R\$ 3,0 milhões.

A figura 110 apresenta os histogramas do VPL por setor e o total da bacia.

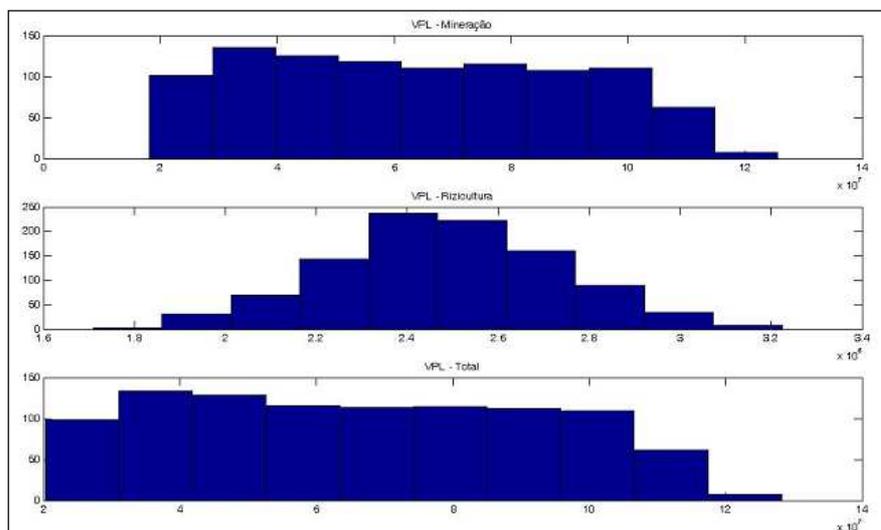


Figura 110: Histograma dos VPL por setor no caso 3

Verifica-se que os valores máximos de VPL têm menor possibilidade de ocorrência tanto para a mineração quanto para o total da bacia e que o setor agrícola tem menor probabilidade de gerar valores extremos, tanto máximos quanto mínimos.

5.6.3 Comportamento da Produção dos Recursos Naturais

A figura 111 apresenta o comportamento da produção de carvão mineral das minas e das usinas de beneficiamento ao longo do horizonte de 60 meses de planejamento.

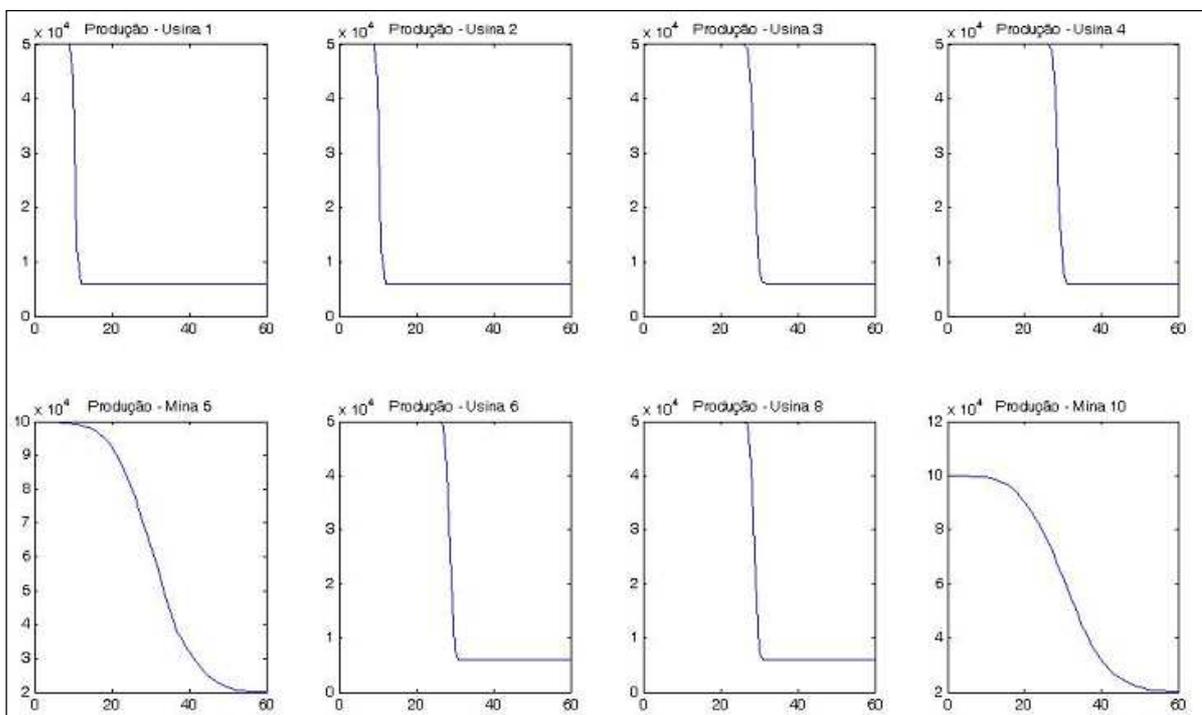


Figura 111: Produção mineral dos agentes instalados na bacia no caso 3

Pode-se perceber que, dada a imposição do tratamento ativo a todos os agentes mineiros, não há dificuldade para que estes mantenham a produção em níveis elevados. Assim sendo, a produção pode ser iniciada em níveis máximos, sendo reduzida ao final do tempo considerado, fazendo com que seja obtido um maior Valor Presente Líquido para a renda gerada pelos agentes. A figura 112 apresenta a evolução da produção de arroz no período considerado.

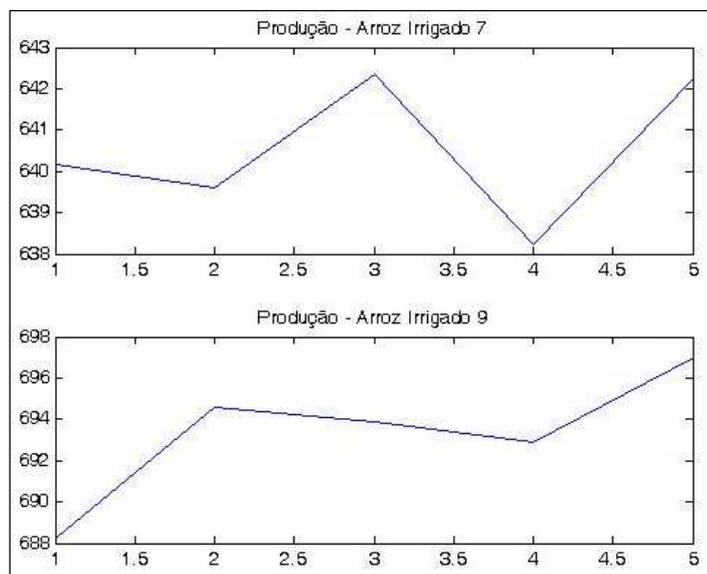


Figura 112: Produção agrícola dos agentes instalados na bacia no caso 3

A desconsideração dos efeitos da concentração de contaminantes na produtividade agrícola não permite diferenças significativas de produção em relação ao caso base.

5.6.4 Comportamento da Qualidade da Água

Como o tratamento ativo anula a descarga dos contaminantes considerados, considera-se não haver alteração no padrão de qualidade das águas da bacia devida às atividades de mineração.

5.6.5 Comportamento do Fluxo de Caixa

Conforme já comentado, o fluxo de caixa dos agentes se comporta de forma semelhante à produção dos respectivos recursos naturais. A figura 113 apresenta o fluxo de caixa dos agentes mineiros.

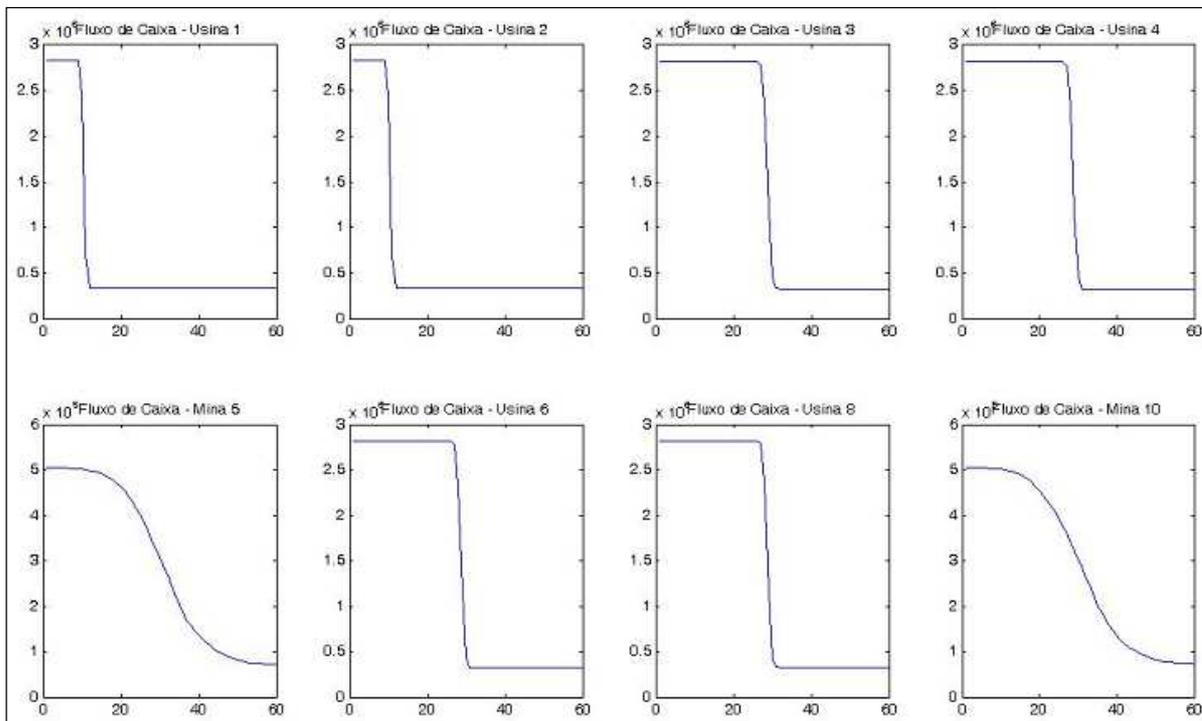


Figura 113: Fluxo de caixa dos agentes mineiros no caso 3

A figura 114 apresenta o fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas.

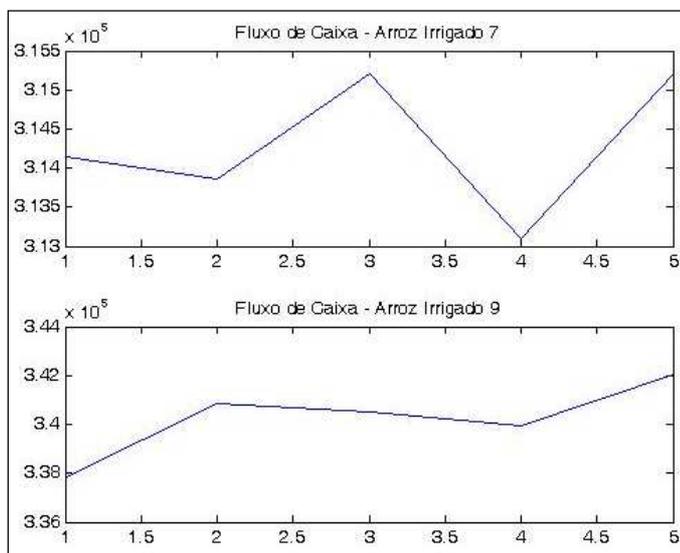


Figura 114: Fluxo de caixa dos empreendedores agrícolas no caso 3

A figura 115 apresenta o fluxo de caixa dos setores de mineração e de agricultura.

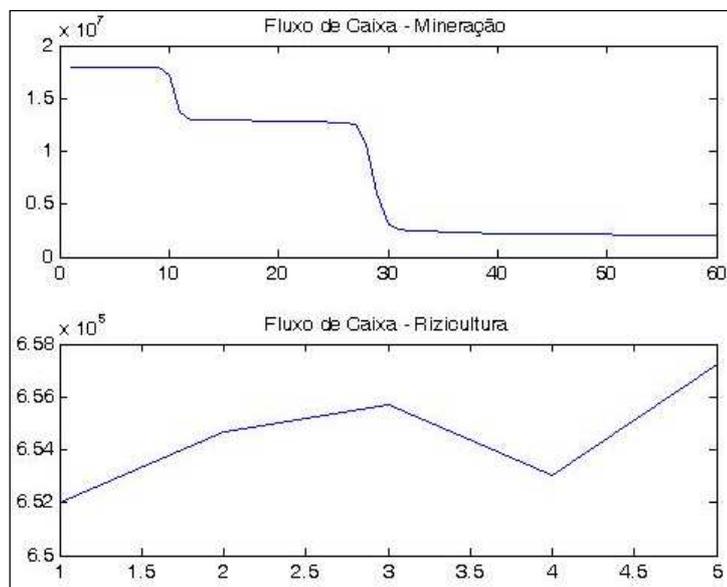


Figura 115: Fluxo de caixa setorial no caso 3

5.6.6 Análise de Sensibilidade

Consideram-se conhecidas as variações do VPL dos agentes, dos setores e total da bacia em função de cada uma das variáveis adotadas no modelo. Além disso, a opção pelo tratamento ativo não gera descarga de contaminantes nas águas da bacia. Portanto, no caso 3 não há análise de sensibilidade.

5.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

O Valor Presente Líquido se destaca como fator principal de comparação entre os cenários. A tabela 36 apresenta o VPL obtido em cada caso estudado com sua respectiva variação em relação ao caso base.

Tabela 36: Comparação entre VPL de cada cenário analisado

CASO	Qdisp	VPL médio (R\$)	Varição em relação ao Caso Base (%)
Caso Base	100%	73.554.975,52	Não há
Caso 1	100%	70.393.924,04	-4,298%
Caso 2	80%	72.202.992,45	-1,838%
Caso 3	48%	66.527.906,76	-9,553%

O maior VPL é aquele obtido no caso base. No entanto, a produção de carvão mineral sem tratamento de efluentes não pode ser considerada a opção mais rentável para a bacia. A baixa qualidade das águas que a falta de tratamento proporciona inviabiliza a instalação de outras atividades e, até mesmo, onera aquelas que já estejam instaladas. Não são considerados, por exemplo, os gastos com a captação de água de bacias vizinhas para a irrigação do arroz. Dessa forma, os casos 2 e 3 apresentam a vantagem de possibilitar a instalação de novas atividades na bacia e, assim, aumentar o VPL resultante.

Face à maior presença da atividade mineira na região, recaem sobre ela os maiores custos de elevação do padrão de qualidade das águas. Além da limitação da quantidade de água a ser utilizada pelos cultivos de arroz, não há no modelo qualquer outro mecanismo que induza à redução do desperdício e/ou ao aumento da eficiência da irrigação. Tal fato se deve à constatação de que já existem custos excessivos a esses empreendedores, causados pela necessidade de captação de água para irrigação em fontes distantes.

Cabe, portanto, verificar a incidência desses custos em cada um dos agentes considerados no modelo. A tabela 37 apresenta tal situação.

Tabela 37: Comparação entre VPL de cada agente instalado na bacia

Agente	Caso Base	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	VPL (R\$)	VPL (R\$)	Variação	VPL (R\$)	Variação	VPL (R\$)	Variação
Agente 1	3.819.387,41	3.610.092,49	-5,48%	3.590.437,85	-5,99%	3.451.156,17	-9,64%
Agente 2	3.819.508,52	3.592.901,54	-5,93%	3.590.551,95	-5,99%	3.451.346,80	-9,63%
Agente 3	7.531.900,71	7.214.091,14	-4,22%	7.485.539,29	-0,62%	6.794.663,00	-9,79%
Agente 4	7.525.700,19	7.207.715,54	-4,23%	7.474.984,33	-0,67%	6.789.487,77	-9,78%
Agente 5	16.711.048,94	15.987.563,81	-4,33%	16.379.875,92	-1,98%	15.035.223,18	-10,03%
Agente 6	7.527.083,03	7.206.711,39	-4,26%	7.477.911,99	-0,65%	6.788.844,40	-9,81%
Agente 7	1.193.344,28	1.190.879,02	-0,21%	1.173.694,54	-1,65%	1.193.344,28	0,00%
Agente 8	7.528.344,27	7.207.747,42	-4,26%	7.475.526,19	-0,70%	6.790.980,59	-9,79%
Agente 9	1.291.138,24	1.288.374,19	-0,21%	1.258.785,47	-2,51%	1.291.138,24	0,00%
Agente 10	16.607.519,73	15.887.847,50	-4,33%	16.295.684,91	-1,88%	14.941.722,32	-10,03%

A variação dos agentes 7 e 9 (empreendedores agrícolas) pode ser atribuída a causas aleatórias, já que não houve alteração das condições de operação desses agentes.

No caso 1, pode ser percebida uma maior redução da renda gerada pelos agentes 1 e 2. Tal fato pode ser explicado pela dificuldade desses agentes em manter o nível máximo de

produção com a alternativa de tratamento passivo simples. Dessa forma, ao produzir maiores quantidades em períodos tardios em relação ao tempo de planejamento considerado, a receita passa a sofrer maior desconto da taxa de juros.

O caso 2 também apresenta maiores reduções para a renda gerada pelos agentes 1 e 2. No entanto, a redução neste caso se situa em patamares semelhantes à redução do caso 1 em relação ao caso base, apesar da incidência de maiores custos de tratamento. Isto se deve à maior possibilidade de produzir em níveis máximos no início da operação.

Cabe ainda ressaltar que, no caso 2, os agentes 3, 4, 6 e 8 apresentam menor taxa de redução em relação ao caso base quando comparados com os agentes 5 e 10, dado que estes últimos sofreram a imposição de um tratamento de efluentes mais caro.

O caso 3 apresenta reduções significativas dos valores médios de todos os agentes. Embora incida sobre todos os agentes os custos do tratamento ativo de efluentes, considera-se excessivo o percentual de redução e atribui-se ao fato a aleatoriedade das variáveis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese do trabalho, são tecidos os comentários finais a respeito do estudo e são propostas novas idéias relacionadas com o tema.

6.1 SÍNTESE DO TRABALHO

O presente estudo é caracterizado pelo desenvolvimento de uma metodologia de análise econômica para a exploração de recursos naturais renováveis e não renováveis com a inclusão de custos ambientais (tratamento de efluentes) e de mecanismos para indução do uso racional da água, dada a capacidade de suporte da bacia segundo o estabelecimento das concentrações legais de determinados parâmetros de qualidade.

A revisão bibliográfica contempla a descrição de aspectos econômicos e legais da exploração de recursos naturais no Brasil e de princípios fundamentais de planejamento e gestão de recursos hídricos. Estes dois tópicos junto com o terceiro, que sustenta a crença de que a bacia hidrográfica é a unidade mais apropriada para planejamento e gestão de recursos hídricos, definem as linhas gerais do presente estudo.

Em seguida, ainda na revisão bibliográfica, são descritas técnicas específicas para aprofundamento do estudo. Assim, são abordadas as tecnologias de produção e manejo de resíduos de carvão mineral e os sistemas de cultivo de arroz irrigado. A teoria econômica dos recursos naturais é abrangida antes de uma revisão sobre as principais técnicas de otimização utilizadas para planejamento e gestão de recursos hídricos.

A metodologia apresentada é baseada na modelagem computacional com o uso da pesquisa operacional. São listados os dados necessários à metodologia para que fossem formuladas as funções econômicas e as equações de restrição do modelo. Em outras palavras, são utilizadas técnicas de otimização para alocação de recursos hídricos entre agentes mineiros e agrícolas, com o objetivo de induzi-los ao seu uso eficiente, de acordo com os respectivos sistemas produtivos no âmbito da bacia hidrográfica.

A área carbonífera do estado de Santa Catarina, onde coexiste a atividade de cultivo de arroz irrigado, é escolhida como caso de estudo. São apresentados os dados relativos à área e é montado o modelo computacional com base na metodologia descrita.

Por fim, a metodologia é aplicada segundo quatro diferentes cenários e os resultados são analisados.

6.2 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, com o uso do modelo elaborado, é possível planejar o uso dos recursos hídricos de forma a reduzir os custos ambientais configurados, principalmente, pela redução da vazão e pela deterioração do padrão de qualidade da água. Verifica-se, ainda, que o mecanismo utilizado pode vir a elevar a geração de renda na bacia, pois, conforme mostram os casos 2 e 3, a reserva de um percentual de água para outros usos que não aqueles considerados no modelo facilita a instalação de novas atividades que dependam tanto do uso consuntivo quanto do uso não consuntivo dos recursos hídricos.

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de estudo mostra-se uma metodologia eficaz de controle da contaminação das águas superficiais, pois a propagação e o transporte de cargas lançadas pelos agentes se dão por elas. Além disso, a adução de água para agricultura eleva a concentração dos contaminantes. Tendo em vista que ambas as atividades provocam consequências sobre uma mesma área territorial, a área da bacia hidrográfica, a elevação do padrão de qualidade da água apenas acontece com uma abordagem conjunta que leve em consideração aspectos das duas atividades.

Cabe, ainda, ressaltar que foram utilizados os valores de vazões e precipitações médias mensais, o que não torna a situação excessivamente restritiva nem tampouco confortável em demasia. Porém, acredita-se que o procedimento seja coerente quanto aos aspectos preventivos, desde que seja salientada a possibilidade de ocorrência de valores extremos um tanto quanto diferentes daqueles usados no modelo.

A fundamentação teórica desenvolvida por Conrad *et al* (1987) para a exploração dos recursos naturais renováveis e não renováveis e aquela desenvolvida por Henderson (1976) para a maximização do bem estar social, quando aplicadas em conjunto, podem aliar o

desenvolvimento econômico com o interesse de outros agentes instalados na bacia. Ademais, pode-se perceber que tais conceitos mostram que a conservação do meio ambiente não deve ser vista como restritiva da atividade econômica. A análise do modelo mostra, ainda, que o uso dos recursos hídricos não deixa de ser realizado, ele é apenas controlado para que não seja ultrapassada a capacidade de fornecimento de águas de boa qualidade.

Conforme apresentado, a falta de planejamento de uso dos recursos naturais acarreta elevados prejuízos financeiros não só a quem os provoca, mas também àqueles que deles dependem. Dessa forma, o modelo apresentado torna possível concluir que, desde que haja o preparo necessário, pode-se aliar uma atividade lucrativa à proteção do meio ambiente. Tal conclusão é corroborada pelo valor positivo obtido pelo modelo para a função-objetivo dos casos 2 e 3, principalmente.

A aplicação do modelo, entretanto, não deve se restringir apenas aos cenários propostos. Em etapa anterior à exploração de carvão mineral, deve o empreendedor analisar e avaliar diferentes cenários e suas consequências. O modelo permite uma fácil manipulação de dados de entrada, o que possibilita a avaliação de novas propostas de estruturas de tratamento de resíduos ou de tecnologias de exploração. Da mesma forma, o empreendedor agrícola deve ter preocupação constante na eficiência dos sistemas de cultivo apresentados, com o objetivo de elevar a produtividade com o mínimo uso dos recursos hídricos e com a manutenção da fertilidade do solo.

A facilidade de manipulação dos dados favorece ainda a aplicação do modelo para atividades econômicas diferentes daquelas consideradas no presente estudo e, portanto, permite sua aplicação em outras bacias hidrográficas (desde que sejam feitas adaptações, principalmente no que diz respeito à geografia e à hidrologia).

A abordagem das incertezas permite que seja verificado o potencial de cada investimento: minas de carvão, usinas de beneficiamento de carvão mineral ou cultivo de arroz irrigado. A observação dos histogramas individuais é interessante para que cada agente decida sobre produção e medidas de controle ambiental dentro do horizonte de planejamento. Em paralelo, um agente regulador, como um Comitê de Bacia, poderia se concentrar no desempenho dos setores e na renda global gerada pela bacia. Além disso, com a qualidade da água restabelecida e a definição dos percentuais de alocação para cada agente e de reserva para outros usos, seria possível o trabalho de busca de novos investidores para o local.

Por fim, cabe destacar mais uma vez, que é possível internalizar custos ambientais e garantir o uso racional dos recursos hídricos e, assim, respeitar a classificação de uso das águas sem que isso inviabilize a mineração de carvão e o cultivo de arroz irrigado.

6.3 LIMITAÇÕES E PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS

Ressalta-se a utilidade do modelo apresentado para os órgãos de controle e fiscalização de bacias hidrográficas. Neste caso, contudo, algumas adaptações podem se fazer necessárias. A primeira delas diz respeito ao fato da possibilidade de haver distintas atividades econômicas com diferentes descargas de poluentes na bacia. Assim, deve-se conhecer não só a quantidade e a qualidade dos despejos individuais, mas também possíveis reações químicas entre as substâncias despejadas. Pode-se sugerir a aplicação de modelo semelhante para diversas atividades econômicas instaladas na bacia que possam abranger vários recursos naturais renováveis e não renováveis.

Conforme comentado, destaca-se a consideração de uso apenas consuntivo para as atividades agrícolas e de uso apenas não consuntivo para as atividades mineiras. Não foi levado em consideração, portanto, o retorno à rede hidrográfica de parte da água utilizada para irrigação do arroz. Em consequência, não foi considerada a descarga nos cursos d'água de contaminantes oriundos de defensivos agrícolas porventura utilizados.

Com uma dinâmica hidrológica distinta daquela verificada no escoamento das águas superficiais, as águas subterrâneas não foram consideradas no modelo. Assim, deixou-se de analisar a questão da contaminação dos aquíferos subterrâneos, fato frequente na mineração de carvão e tema de relevada importância à sociedade. Também não foi considerada a exploração de aquíferos subterrâneos para irrigação de cultivos. Dessa forma, podem ser feitas três novas propostas de estudos: o desenvolvimento de modelo específico para abordagem das águas subterrâneas, o aprimoramento do modelo elaborado com a inclusão das águas subterrâneas e a elaboração de novo modelo, mais amplo, com presença de diversas atividades econômicas e a inclusão da problemática das águas subterrâneas.

Na área econômica, o modelo também pode ser incrementado. Mais relacionado com estratégias de investimento, o Valor Presente Líquido pode não ser o parâmetro mais adequado para verificação da renda gerada na bacia. Indicadores técnicos econômicos como o

Produto Interno Bruto podem ser mais indicados, porém requerem maior conhecimento teórico. Além disso, o avanço do modelo na área social poderia ser obtido com o cálculo de estimativas de indicadores de geração de emprego e renda a partir de sua aplicação. Destaca-se, ainda, que efeitos distributivos podem ser incorporados à função de bem estar social por meio de compensações entre agentes ou subsídios governamentais e/ou privados. A incorporação desses efeitos tem como objetivo a busca do conceito de “ótimo de Pareto”.

Por fim, destaca-se a necessidade de aperfeiçoamento do modelo de otimização. A Programação Dinâmica é uma importante técnica de apoio à tomada de decisão, mas requer cuidados com o problema da dimensionalidade. A adoção de apenas três alternativas de alocação de recursos hídricos teve como objetivo contornar tal limitação. O modelo computacional, quando testado com mais alternativas, ora apresentou tempo excessivo para conclusão, ora não foi concluído. Assim sendo, considera-se que deve haver uma preocupação especial com a implementação do modelo em bacias onde existam mais agentes instalados do que aqueles considerados no presente estudo e/ou sejam consideradas mais opções de alocação de recursos hídricos do que as utilizadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, S., KHAN, I. H., PARIDA, B. P. (2001) Performance of Stochastic Approaches for Forecasting River Water Quality. **Water Research**, Vol 35, Nº 18, p. 4261-4266
- BARBOSA, P. S. F. (2002). Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. PORTO, R. L. (org.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- BARRETO, M. L. (2001). Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 215p.
- BARROS, M. T. L. (2002). A Programação Dinâmica Aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. PORTO, R. L. (org.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- BATTY, L.C (2005). The Potential Importance of Mine Sites for Biodiversity. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 101-103.
- BEDNAR, A., GARBARINO, J. R., BURKHARDT, M. R., RANVILLE, J. F., WILDERMAN, T. (2004) Field and Laboratory Arsenic Speciation Methods and their Application to Natural Water Analysis. **Water Research** vol. 38, p.355-364.
- BÉNÉ, C.; DOYEN, L.; GABAY, D. (2001) A Viability Analysis for a Bio-economic Model. **Ecological Economics**, Nº 36, p. 385-396.
- BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L.; BECKER, L.; YEH, W. (1985). Capacity Expansion of São Paulo Water Supply. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol. 11, Nº 2.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.
- BRASIL. Presidência da República (1967). Decreto-Lei n. 227 de 28 de fev. de 1967. **Dá nova redação ao Decreto-Lei n. 1.985, de 29 de jan. de 1940 (Código de Minas)**. Disponível em www.planalto.gov.br/CCIVIL/Decreto-Lei/Del0227.htm, acesso em 15 de dezembro de 2007.
- CAI, X.; RINGLER, C.; ROSEGRANT, M. W. (2006) Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Methodology and Application to the Maipo River Basin. **Research Report Nº 149**. Washington: International Food Policy Research Institute.
- CAUDURO, F.A. (1996) Apontamentos de irrigação. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 186p.
- CETEM (2001). **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Hidrográfica Sul Catarinense**. Vol III. Março. Disponível em www.siecesc.com.br, acesso em 25 de fevereiro de 2008.

- CHRISTENSEN, N. L., BARTUSKA, A. M., BROWN, J. H., CARPENTER, S., D'ANTONIO, C., FRANCIS, R., FRANKLIN, J. F., MACMAHON, J. A., NOSS, R. F., PARSONS, D. J., PETERSON, C. H., TURNER, M. G.; WOODMANSEE, R. G. (1986) The Report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. **Ecological Applications**. Vol. 6. p. 665-691.
- CIRILO, J. A. (2002). Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. PORTO, R. L. (org.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- CLARK, W. C. (1986). Sustainable Development of the biosphere: Themes for a Research Program. In: W. C. Clark e R. E. Munn, editors. **Sustainable Development of the Biosphere**. IIASA e Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- COLWELL, R. (1998) Balancing the Biocomplexity of the Planet's Living Systems: a Twenty-first Century Task for Science. **BioScience** vol 48, p. 786-787.
- CONAMA (2005). Resolução n. 357 de 18 de mar. de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Disponível em www.mma.gov.br, acesso em 15 de mar. de 2008.
- CONRAD, J. M. (1999) Resource Economics. New York: Cambridge University Press.
- CONRAD, J. M. (1997). Renewable Resources and Economic Growth. **Ecological Economics**, Nº 22, p. 275-276.
- CONRAD, J.M.; CLARKE, C.W. (1987) **Natural Resource Economics: Notes and Problems**. Cambridge: Cambridge University Press, 231p.
- COULTON, R., WILLIAMS, K. (2005) Active Treatment of Mine Water: A European Perspective. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 23-26.
- DALTON, T. R.; COATS, R. M.; ASRABADI, B. R. (2005) Renewable Resources, Property Rights-Regimes and Endogenous Growth. **Ecological Economics**, Nº52, p. 31-41.
- EMBRAPA (2003) Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação para o Agronegócio Brasileiro: Cenário 2002-2012. Brasília: Secretaria de Gestão e Estratégia – Informação Tecnológica, p. 92.
- ERDLENBRUCH, K.; TIDBALL, M.; van SOEST, D. (2008). Renewable Resources Management, User Heterogeneity and the Scope for Cooperation. **Ecological Economics**, Nº 64, p. 597-602.
- FARIAS, C. (2002) **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Relatório Preparado para o CGEE – PNUD. Disponível em <http://www.cgge.org.br> , acesso em 06 de março de 2009.
- FIRTH, J. (1998) Freshwater: Perspectives on Integration of Research, Education and Decision Making. **Ecological Applications** vol. 8, N. 3, p.601-609.

- FLORES, M. X.; NASCIMENTO, J. C. (1992) Desenvolvimento Sustentável e Competitividade na Agricultura Brasileira. Brasília: EMBRAPA-SEA, p. 30.
- FREITAS, M. (1999). **O Estado das Águas no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília: ANEEL/MME /MMA/SRH.
- GAILOR, O.; WEIL, D.N. (2000). Population, technology and growth: from Malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. **American Economic Review**, N° 90, p. 806–828.
- GARCIA, R. C. (2009) Alguns Desafios ao Desenvolvimento do Brasil. Brasília: IPEA, janeiro de 2009 (Texto para Discussão N° 1373).
- GIBSON, J. **Coal and the Environment**. Rio de Janeiro: Science Reviews, 1987. 59p.
- GLEICK, P. H. (1998) Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use. **Ecological Applications** vol. 8, N. 3, p.571-579.
- GOMES, C. J. B. (2005) Projeto de Recuperação Ambiental: Áreas Impactadas Pela Mineração de Carvão. In: **I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina**.
- GOTHE, C. (1993) **Avaliação dos Impactos Ambientais da Indústria Carbonífera nos Recursos Hídricos da Região Sul-Catarinense**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Dissertação de Mestrado em Geografia.
- GUSEK, J., CLARKE-WHISTLER, K. (2005) Where does the Recovery of Metal Resources from Passive Treatment Systems fit in Sustainable Development Initiatives associated with Large Mining Projects? In: **National Meeting of the American Society for Mining and Reclamation**.
- GUSEK, J. (2005) Passive Treatment System Design, Construction and Operating Costs: How Much it Really costs Comparative to the Alternatives? In: **I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina**.
- HALLBERG, K., JOHNSON, D. (2005) Mine Water Microbiology. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 28-32, 2005.
- HARDIN, G. (1968) The Tragedy of the Commons. **Science**, vol. 162 (3854), p.1243-1248, Dec.
- HELPER, F. (2006) Demandas e Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (RS) nos Cenários Atual e Futuro para Diferentes Sistemas de Produção de Arroz Irrigado. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HENDERSON, J. (1976) **Teoria Microeconômica: uma abordagem matemática**. São Paulo: Pioneira, 417 p.

- HOTELLING, H. (1931) The economics of exhaustible resources. **Journal of Political Economy**, N° 39, p. 137–175.
- HUBER, C. V. (1989) A Concerted Effort for Water Quality. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Vol 61. p. 310-315.
- IBGE (2006) Estatísticas do Século XX. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/seculoxx/seculoxx.pdf>. Acesso em 12 de março de 2010.
- IBRAM (2009) Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. Disponível em <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em 15 de março de 2010.
- IRGA (2010) Preços do Arroz. Disponível em <http://www.irga.rs.gov.br/index.php>. Acesso em 20 de agosto de 2010.
- JACOBS, J.; FREEMAN, G.; GRYGIER, J.; MORTON, D.; SCHULTZ, G.; STASCHUS, K.; STENDINGER, J. (1995). A Stochastic Multi-Reservoir Hydroelectric Scheduling Model. *Integrated Water Resources Planning for the 21st Century*, p. 828-831.
- JAGER, W., JANSSEN, M.A., DE VRIES, H.J.M., DE GREEF, J., VLEK, C.A.J (2000). Behavior in Commons Dilemmas: Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological economic model. **Ecological Economics** N° 35, p. 357-379.
- KARR, J. (1991) Biological Integrity: a Long-Neglected Aspect of Water Resources Management. **Ecological Applications** vol. 1, N. 1, p.66-84.
- KINDLER, J. (1998) Linking Ecological and Development Objectives: Trade-offs and Imperatives. **Ecological Applications** vol. 8, N. 3, p.591-600.
- KNOBLAUCH, R. (1997) Adubação das Mudanças de Arroz Irrigado em Caixas para Transplante. In: Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, N° 22, Balneário Camboriú, Itajaí: EPAGRI, p. 209-212.
- KRUTILLA, K.; REUVENY, R. (2006). The System Dynamics of Endogenous Population Growth in a Renewable Resource-based Growth Model. **Ecological Economics**, N° 56, p. 256-267.
- KOCH, H.; GRÜNEWALD, U. (2008) A Comparison of Modeling Systems for the Development and Revision of Water Resources Management Plans. **Water Resources Management**. DOI 10.1007/s11269-008-9333-x.
- KUHN, H. W. ; TUCKER, A. W. (1951). Nonlinear Programming. In: Berkeley Symposium of Mathematics, Statistics and Probabilities. California: University of California Press.
- LAJOIE, M. (1999) L'Approche Écosystémique et la Gestion par Bassin Versant. Québec : Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement.
- LANNA, A. E. L. (2002) Introdução. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. PORTO, R. L. (org.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

- LOUCKS, D. P.; van BEEK, E. (2005). *Water Resources System Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turim: UNESCO.
- MACHADO, S. L. O.; MARCHEZAN, E.; RIGHES, A. A.; CARLESSO, R.; VILLA, S. C. C.; CAMARGO, E. R. (2006) Consumo de Água e Perdas de Nutrientes e de Sedimentos na Água de Drenagem Inicial do Arroz Irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol. 36, Nº 01, p. 65-71.
- MALTHUS, T. (1789) *An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society: with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet and other writers*. London: Johnson.
- MARCHEZAN, E.; VILLA, S. C. C.; MACHADO, S. L. O. (2005) Consumo de Água e Desempenho de Cultivos de Arroz Irrigado em Diferentes Sistemas de Cultivo. **Informe Técnico**, Santa Maria: UFSM, Centro de Ciências Rurais, Nº 03, 10 p.
- MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M. (2001) Consumo de Água em Três Sistemas de Cultivo de Arroz (*Oriza Sativa L.*). In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Fortaleza: ABID, p. 59-63.
- MAYS, L. W.; TUNG, Y. K. (1992). *Hydrosystems Engineering & Management*. New York: McGraw-Hill.
- MENDES, C. A. B. (2006a) **Cargas Poluentes**. Notas de aula da disciplina de Economia dos Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS.
- MENDES, C. A. B. (2006b) **Meio ambiente: Produtor e Receptor**. Notas de aula da disciplina de Economia dos Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS.
- MILL, J.S. (1848) *Principles of Political Economy: With Some of their Applications to Social Philosophy*. Reedição (1965). Toronto: University of Toronto Press.
- NAIMAN, R. J.; TURNER, M. G. (2000) A Future Perspective on North America's Freshwater Ecosystems. **Ecological Applications** vol. 10, N. 4, p.958-970.
- NORTON, G.A. (1984). *Resource Economics*. Edward Arnold, London.
- OPRICOVIC, S. (2008) A Compromise Solution in Water Resources Planning. **Water Resources Management**. DOI 10.1007/s11269-008-9340-y
- OSM (2006). **Getting Started Help for AMDTreat v4.0**. Disponível em <http://amd.osmre.gov/GettingStarted.htm>, acesso em 15 de fev. de 2010.
- PIRAMID CONSORTIUM (2003). **Engineering Guidelines for the Passive Remediation of Acidic and/or Metalliferous Mine Drainage and Similar Wastewaters**. European Commission 5th Framework RTD Project , Passive in-situ Remediation of Acidic Mine/Industrial Drainage (PIRAMID), University of Newcastle upon Tyne, UK.

- PIRES, J., SANTOS, J. (1995) Bacias Hidrográficas. Integração entre Meio Ambiente e Desenvolvimento. In: **Ciência Hoje, Águas no Brasil: má utilização e falta de planejamento**. No 110. SBPC. Rio de Janeiro.
- PINDYCK, R., RUBINFELD, D. (2002) **Microeconomia**. São Paulo: Prentice Hall, 711p.
- PINDYCK, R. (1978) The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources. **Journal of Political Economy**, vol. 86 (5), p.841-861.
- POLEMIS, M., RAPANOS, V. (2005) Energy Demand and Environmental Taxes: the Case of Greece. **Energy Policy**, vol. 3, p.1781-1788.
- POLICANSKI, D. (1998) Science and Decision Making for Water Resources. **Ecological Applications** vol. 8, N. 3, p.610-618.
- POLLS, I. (1994). How People in the Regulated Community View Biological Integrity. **Journal of the North American Benthological Society**. Vol. 13. p. 598-604.
- POSTEL, S. (2000) Entering an Era of Water Scarcity: The Challenges Ahead. **Ecological Applications** vol. 10, N. 4, p.941-948.
- REES, B. (2005) An Overview of Passive Mine Water Treatment in Europe. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, Springer-Verlag.
- REGEV, U.; GUTIERREZ, A. P.; SCHREIBER, S. J.; ZILBERMAN, D. (1998) Biological and Economic Foundations of Renewable Resources Exploitation. **Ecological Economics**, N° 26, p. 227-242.
- RICARDO, D. (1817) The Principles of Political Economy and Taxation. Reedição, introdução de Donald Winch (1993) London: Dent.
- RICHTER, B. D.; MATHEWS, R.; HARRISON, D. L.; WIGINGTON, R.. (2003) Ecologically Sustainable Water Management: Managing River Flows for Ecological Integrity. **Ecological Applications** vol. 13, N. 1, p.206-224.
- RISSER, P. G. (1996). Decision-Makers Must Lead in Defining Some Environmental Science. **Ecological Applications**. Vol 6. p. 24-26.
- RODRIGUEZ, F.A. (1998). Gerenciamento de recursos hídricos. Brasília: MMA, SRH, 292p.
- ROSENBROK, H. H. (1960). Computer J., p. 3-174.
- SALLAS, J.D., DELLEUR, J.W., YEVJEVICH, V., LANE, W.L. (1980) **Applied Modeling of Hydrologic Time Series**. Colorado: Water Resources Publication. 490p.
- SANTA CATARINA. (1997a) Plano de Gestão e Gerenciamento da Bacia do Rio Araranguá. Vol II: **Caracterização Hidrológica**. Florianópolis: Epagri.
- SANTA CATARINA. (1997b) Plano de Gestão e Gerenciamento da Bacia do Rio Araranguá. Vol IV: **Disponibilidade das Águas Superficiais**. Florianópolis: Epagri.

- SEN, Z. (1978). A Mathematical Model of Monthly Flow Sequences. **Hydrological Sciences**. Bulletin des Sciences Hydrologiques. Vol 23, N° 2.
- SEYAM, I.M., HOEKSTRA a, A.Y. (2000). The water value-flow concept. **Value of Water Research Report Series no. 3**, IHE Delft, The Netherlands.
- SEYLER, J., FIGUEROA, L., AHMANN, D., WILDERMAN, T., ROBUSTELLI, M. (2005) Effects of Solid Phase Organic Substrate Characteristics on Sulfate Reducer Activity and Metal Removal in Passive Mine Drainage Treatment Systems. **National Meeting of American Society for Mining and Reclamation**.
- SIECESC (Sindicato das Indústrias de Extração de Carvão Mineral) (1996). **O Impacto do Carvão Mineral na Economia Brasileira**. Fundação Getúlio Vargas: Rio de Janeiro.
- SMITH, N. J. H.; FALESI, I. C.; ALVIM, P. T.; SERRÃO, E. A. S. (1996) Agroforestry Trajectories among Smallholders in the Brazilian Amazon: innovation and resiliency in pioneer and older settled areas. **Ecological Economics**, N° 18. P. 15-27.
- SOARES, D. M.; THUNG, M.; MORAIS, O. P.; BARRIGOSI, J. A. F.; AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. (2006). Perspectivas de Área, Produção e Produtividade do Arroz no Brasil em 2011. Disponível em <http://www.cnpaf.embrapa.br>. Acesso em 07 de março de 2010.
- SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) (2007) **Recomendações Técnicas para a Pesquisa no Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 161p.
- STROBEL, O. M. (1979). Dimensionamento e Operação de Reservatórios Através do Método das Restrições Probabilísticas e da Regra de Decisão Linear. São Paulo: EPUSP. Dissertação (Mestrado).
- ÜNAL, N. E., AKSOY, H., AKAR, T. (2004). Annual and Monthly Rainfall Data Generation Schemes. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. Vol 18, p. 245-257.
- UNESC. (1996). Plano Básico de Desenvolvimento Ecológico e Econômico – PBDEE. Área da AMREC. Criciúma: UNESC.
- VERA-DIAZ, M. C.; KAUFMANN, R. K.; NEPSTAD, D. C.; SCHLESINGER, P. (2008) An Interdisciplinary Model of Soybean Yield in the Amazon Basin: The Climatic, Edaphic, and Economic Determinants. **Ecological Economics**, N° 65, p. 420-431.
- VOTRUBA, L.; BROZA, V. (1988) Analysis of Water Resources System. **Development in Water Science**. Vol. 33.
- WALKER, R.; HOMMA, A. K. O. (1996) Land Use and Land Cover Dynamics in the Brazilian Amazon: an Overview. **Ecological Economics**, N° 18, p. 67-80.
- WEBER, L. (2000) Consumo e Qualidade da Água e Cultivares de Arroz Irrigado em Diferentes Sistemas de Cultivo. Santa Maria: UFSM, 52p. Dissertação (Mestrado).

- WEINHOLD, D. (1999) Estimating the Loss of Agricultural Productivity in the Amazon. **Ecological Economics**, N° 31, p. 63-76.
- WORLD COAL INSTITUTE (2010) **The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal**. Disponível em www.worldcoal.org. Acesso em 22 de março de 2010.
- YANDLE, B., VIJAYARAGHAVAN, M., BHATTARAI, M. (2002) **The Environmental Kuznets Curve**. PERC Research Study. May 2002.
- YOUNGER, P. (2004) Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. **Mine Water and the Environment**, Springer-Verlag.
- ZAFFARONI, E.; TAVARES, V. E. (1999) O licenciamento ambiental dos produtores de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, Brasil. In.: Encontro das Águas, Paraguai. Disponível em www.iica.org.uy/p2-8.htm. Acesso em 22 de fevereiro de 2010.