MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

SIMULAÇÃO SÓCIO-HIDROLÓGICA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: UMA ABORDAGEM DE USO INTEGRADO DO MODELO CHUVA-VAZÃO E SISTEMAS MULTIAGENTE

por

Bruna da Silva Leitzke

Tese para obtenção do Título de
Doutora em Modelagem Computacional

Rio Grande, junho, 2021

Dedico esta tese às mulheres que
me ensinaram a insistir nos meus sonhos.
À minha mãe Elisabete,
e às minhas avós Noely e Sirley.

Bruna da Silva Leitzke

“SIMULAÇÃO SÓCIO-HIDROLÓGICA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: UMA ABORDAGEM DE USO INTEGRADO DO MODELO CHUVA-VAZÃO E SISTEMAS MULTIAGENTE”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
DIANA FRANCISCA ADAMATTI
Data: 18/07/2023 13:44:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Diana Francisca Adamatti (Orientadora – FURG)

Documento assinado digitalmente
gov.br
CATIA MARIA DOS SANTOS MACHADO
Data: 19/07/2023 20:25:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Catia Maria dos Santos Machado (FURG)

Documento assinado digitalmente
gov.br
SAMUEL BESKOW
Data: 19/07/2023 10:36:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Samuel Beskow (UFPel)

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARILTON SANCHOTENE DE AGUIAR
Data: 19/07/2023 10:59:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Marilton Sanchotene de Aguiar (UFPel)

Documento assinado digitalmente
gov.br
CONCEICAO DE MARIA ALBUQUERQUE ALV
Data: 18/07/2023 18:49:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Conceição de Maria Albuquerque Alves (UnB)

Rio Grande - RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço à vida e às oportunidades que tive até este momento.

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Diana Francisca Adamatti, pela confiança no meu trabalho, pelos aprendizados, e por toda a ajuda e incentivo, que foram muito importantes durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha mãe Elisabete, por ser minha melhor amiga e meu exemplo de persistência. Ao meu pai Gilson, pelo apoio incondicional à minha formação. Às minhas avós Noely e Sirley, por me impulsionarem a lutar pela minha felicidade. Ao meu avô João Pedro, pelas palavras de sabedoria e afeto.

Agradeço ao meu companheiro de vida Maicon, pelo amor genuíno, e pela preocupação e dedicação com o meu bem-estar. Agradeço ao Arnaldo, à Claudete e à Lilian, por me acolherem na família e sempre estarem presentes, com palavras de carinho e torcendo pela minha felicidade.

Agradeço aos meus afilhados Bento e Caio, que me nutriram de amor e força, com a chegada neste mundo. Agradeço à minha afilhada Manuela que, desde a minha graduação, é uma pessoa que me inspira a ser melhor a cada dia. Agradeço aos meus tios Elisete, Luis Alexandre e Sandra, e aos meus primos e amigos Camila e Luis Alexandre, por me acompanharem ao longo de toda a minha vida, me trazendo paz e alegria.

Agradeço aos amigos de infância Bruna, Cristina, Jade, Juliana, Matheus, Renata e Patrícia, que, além de todo amor e apoio, me ajudaram a descobrir quem eu sou e a construir o meu caminho. Agradeço às amigas que conheci ao longo da vida acadêmica, Alessandra, Daniela e Elisa, pela ajuda e pelas conversas, das quais trouxeram leveza para os meus dias.

Agradeço à psicóloga Renata Bastos, que me acompanhou durante todo o meu doutorado, e cujo auxílio me impulsionou a acreditar na minha capacidade, e a enfrentar os medos e as inseguranças que surgiram.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas, da UFPEL, pelo acolhimento e aprendizado. Agradeço às engenheiras Dr^a. Maíra Moura e Dr^a. Marcelle Vargas, por todo apoio, dedicação e atenção às minhas dúvidas e aos ajustes técnicos necessários para o desenvolvimento desta tese. Agradeço à Prof^a. Dr^a. Catia Maria Machado, à Prof^a. Dr^a Conceição de Maria Alves, ao Prof. Marilton de Aguiar, e ao Prof. Dr. Samuel Beskow, pela atenção e por todas as contribuições ao meu trabalho.

Agradeço à CAPES e a ANA pelo apoio financeiro (processo número 88887.335074/2019-00), do qual foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço aos coordenadores e aos membros do Projeto Gestão Participativa dos Recursos Hídricos Utilizando Jogos Computacionais e Sistemas Multiagente, pelas contribuições e pelos momentos de descontração. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, pela oportunidade de crescer academicamente e adquirir novos conhecimentos.

”Enquanto há vida, há esperança.”
Stephen Hawking

RESUMO

A água é um dos recursos naturais mais importantes no planeta, sendo uma necessidade para a subsistência de pessoas, animais e plantas. Através do seu uso, importantes avanços vêm ocorrendo em áreas como agricultura, pecuária, indústria e construção. Entretanto, como consequência das mudanças terrestres, naturais ou antrópicas, tem-se, por vezes, impactos negativos para o meio ambiente, a sociedade e a economia. Os Sistemas Multiagente e os Modelos Chuva-Vazão são algumas das ferramentas que vêm sendo utilizadas, com o intuito de descrever parte do sistema hidrológico, ou para simular as consequências de mudanças no sistema hidrológico. Enquanto os Sistemas Multiagente possibilitam modelar e simular os sistemas sociais e a tomada de decisão das partes interessadas, os Modelos Chuva-Vazão modelam e simulam os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, em diferentes escalas temporais e espaciais. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma proposta de abordagem acoplada utilizando Sistemas Multiagente e o Modelo Chuva-Vazão - *Lavras Simulation of Hydrology*, para analisar a tomada de decisão sobre mudanças do uso do solo da bacia hidrográfica do Arroio Fragata. Primeiramente, uma revisão sistemática da literatura foi realizada para determinar e analisar os principais trabalhos que envolvem essas duas ferramentas no contexto de problemas hidrológicos. A revisão mostrou que, embora elas possam ser integradas em um único modelo, a dinâmica dessa integração é um dos principais desafios. No que se refere aos processos da modelagem hidrológica, tem-se a busca, definição e caracterização das bases de dados espaciais e temporais, a calibração de parâmetros e a validação do modelo. Já o Sistema Multiagente é desenvolvido a partir da definição dos agentes, suas características e regras, da determinação do ambiente, e das principais interações entre os agentes e o ambiente. Neste trabalho, no Sistema Multiagente, os agentes são os tomadores de decisão com relação a modificação e uso do solo em regiões específicas, de acordo com condições estabelecidas. Além disso, os gestores podem negociar parcelas da região, ampliando as possibilidades de mudança no uso do solo. A mudança no uso do solo gera alterações nos atributos do uso do solo da região. Esses dados são atualizados no modelo hidrológico, do qual gera as vazões para o cenário e atualiza as condições do ambiente no Sistema Multiagente. A modelagem acoplada foi estabelecida a partir de cenários principais de mudança no uso do solo, a saber: mudança total do ambiente; mudanças a partir de tendências históricas; e mudanças arbitrárias. Os resultados mostram que a ferramenta possibilita a integração entre o Sistema Multiagente e o Modelo Chuva-Vazão, para descrever o comportamento do sistema sócio-hidrológico da bacia hidrográfica do Arroio Fragata, gerando contribuições para a análise da tomada de decisão sobre a mudança no uso do solo da região.

Palavras-chave: Sistema multiagente; modelo chuva-vazão; mudança no uso do solo; modelagem acoplada; simulação sócio-hidrológica.

ABSTRACT

Water is one of the most important natural resources on the planet, being a necessity for the subsistence of people, animals, and plants. Through its use, important advances have been taking place in areas such as agriculture, livestock, industry, and construction. However, as a consequence of terrestrial, natural, or anthropic changes, there are sometimes negative impacts on the environment, society, and the economy. Multiagent Systems and Rainfall-Runoff Models are some of the tools used to describe part of the hydrological system or to simulate the consequences of changes in the hydrological system. While Multiagent Systems make it possible to model and simulate social systems and stakeholder decision-making, Rainfall-Runoff Models allow modeling and simulating hydrological processes in a watershed, at different temporal and spatial scales. In this sense, this work presents a proposal for a coupled approach using Multiagent Systems and the Rainfall-Runoff Model - *Lavras Simulation of Hydrology*, to analyze decision-making on changes in land use in the Arroio Fragata watershed. First, a systematic literature review was conducted to determine and analyze the main works involving these two tools in the context of hydrological problems. The study showed that, although they can be integrated into a single model, the dynamics of this integration are one of the main challenges. About hydrological modeling processes, there is the search, definition, and characterization of spatial and temporal databases, parameter calibration, and model validation. The Multiagent System is developed from the definition of the agents, their characteristics and rules, the determination of the environment, and the main interactions between the agents and the environment. In this work, in the Multiagent System, the agents are the decision makers regarding the modification and use of the soil in specific regions, according to established conditions. In addition, managers can negotiate portions of the region, expanding the possibilities for changing land use. The change in land use generates alterations in the attributes of land use in the region. This data is updated in the hydrological model, which generates the flows for the scenario and updates the environmental conditions in the Multiagent System. Coupled modeling was established based on three main land use change scenarios, namely: total environmental change; changes from historical trends; and arbitrary changes. The results show that the tool enables the integration between the Multiagent System and the Rainfall-Runoff Model, to describe the behavior of the socio-hydrological system of the Arroio Fragata watershed, generating contributions for the analysis of decision-making on the change in the use of the soil in the region.

Keywords: Multiagent system; rainfall-runoff model; change in land use; coupled modeling; socio-hydrological simulation.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 24
1.1 Motivação 24
1.2 Hipótese de pesquisa 29
1.3 Objetivos 29
1.4 Estrutura do trabalho 30
2 EMBASAMENTO TEÓRICO 31
2.1 Modelos hidrológicos 31
2.1.1 Modelo hidrológico chuva-vazão LASH 34
2.2 Sistemas multiagente 35
2.2.1 Plataforma GAMA 38
2.2.2 Uso de SMA em problemas hidrológicos 39
2.3 Revisão sistemática da literatura 40
2.3.1 Metodologia da RSL 41
2.3.2 Resultados da RSL 46
3 MATERIAIS E MÉTODOS 49
3.1 Região de Estudo 49
3.1.1 Dados temporais 50
3.1.2 Dados espaciais 52
3.2 Modelagem Hidrológica 57
3.2.1 Rotina hidrológica do LASH 60
3.3 Simulação baseada em multiagente 66
3.3.1 Plataforma GAMA 66
3.3.2 Sistema multiagente 67
3.4 LASH e SMA: modelagem acoplada e cenários de mudança no uso do solo . . . 74
4 RESULTADOS 78
4.1 Calibração e Validação do modelo LASH 78
4.2 Simulações do modelo sócio-hidrológico 82
4.2.1 Cenário 1: Mudanças do uso do solo em toda a região 82
4.2.2 Cenário 2: Mudanças do uso do solo de acordo com as tendências 87
4.2.3 Cenário 3: Mudanças aleatórias do uso do solo 131
5 CONCLUSÕES 155
REFERÊNCIAS 157
A ANEXOS 171
A.1 Teste não-paramétrico de Mann-Kendall 171
B APÊNDICES 173
B.1 Síntese dos estudos primários obtidos na RSL 173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráficos do total de água no planeta. 25
Figura 2: Representação do ciclo hidrológico. 31
Figura 3: Visão abstrata de um agente em seu ambiente. 36
Figura 4: Representação das etapas da simulação baseada em multiagente. 37
Figura 5: Diagrama de palavras-chave. 43
Figura 6: Quantidade de trabalhos por base bibliográfica. 45
Figura 7: Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata. 49
Figura 8: Pontos de monitoramento das estações hidrometeorológicas utilizadas neste estudo. 51
Figura 9: Pluviograma e hidrograma de dados diários observados. 52
Figura 10: Distribuição espacial das classes de solo na BHAF. 53
Figura 11: Distribuição espacial de uso e cobertura do solo na BHAF. 54
Figura 12: Discretização espacial da BHAF em 39 sub-bacias. 56
Figura 13: Distribuição espacial de uso e cobertura do solo na BHAF referente a situação em: (a) 2002; (b) 2009; e (c) 2015. 57
Figura 14: Estrutura do modelo desenvolvida em GAMA. 67
Figura 15: Interface de simulação do SMA desenvolvido em GAMA. 68
Figura 16: Fluxograma de determinação das intenções dos agentes no SMA. 69
Figura 17: Fluxograma da negociação e da mudança no uso do solo realizada por um gestor, quando há negociação entre os agentes. 71
Figura 18: Possíveis respostas a mudanças no uso do solo no MABS. 72
Figura 19: Possíveis respostas a negociações de compra e venda de um lote no MABS. 72
Figura 20: Valores iniciais das vazões, da quantidade de células ocupadas e das quantidades de células por uso do solo do MABS. 73
Figura 21: Representação dos valores iniciais para as produções de cada agente. . . . 74
Figura 22: Atributo resistência estomática do uso e cobertura do solo, de acordo com os períodos sazonais e as sub-bacias definidas na BHAF. 75
Figura 23: Hidrograma diário observado e estimado pelo modelo LASH para o período de calibração na seção de controle da BHAF à montante da seção de controle “Ponte Passo dos Carros” (BHAF-PC). 79
Figura 24: Hidrograma diário observado e estimado pelo modelo LASH para o período de validação na seção de controle da BHAF à montante da seção de controle “Ponte Passo dos Carros” (BHAF-PC). 80
Figura 25: Curvas de permanência para a calibração do LASH, de acordo com os parâmetros calibrados na seção de controle da BHAF-PC. 81
Figura 26: Curvas de permanência para a validação do LASH, de acordo com os parâmetros calibrados na seção de controle da BHAF-PC. 81

Figura 27: Mudança do uso do solo em 100% da BHAF em GAMA para: (a) pastagem; (b) agricultura; (c) solo exposto; e (d) silvicultura. 83
Figura 28: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para pastagem. 84
Figura 29: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para agricultura. 84
Figura 30: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para solo exposto. 84
Figura 31: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para silvicultura. 85
Figura 32: Vazões mínimas anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura. 86
Figura 33: Vazões médias anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF para: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura. 86
Figura 34: Vazões máximas anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura. 86
Figura 35: Parâmetros iniciais para o cenário 2, considerando: (a) 10% de mudança do uso do solo no ambiente - 257 células; e (b) 20% de mudança do uso do solo no ambiente - 515 células. 87
Figura 36: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 10% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6. 88
Figura 37: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 10% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10. 89
Figura 38: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 90
Figura 39: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 91
Figura 40: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 91
Figura 41: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 92
Figura 42: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 93
Figura 43: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 93
Figura 44: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 94
Figura 45: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 94

Figura 46: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 95
Figura 47: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 95
Figura 48: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 96
Figura 49: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 96
Figura 50: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 97
Figura 51: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 97
Figura 52: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 98
Figura 53: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 98
Figura 54: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 99
Figura 55: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente. 99
Figura 56: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.100
Figura 57: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 101
Figura 58: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 101
Figura 59: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.102
Figura 60: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 102
Figura 61: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo. 103
Figura 62: Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 103
Figura 63: Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 103
Figura 64: Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 104

Figura 65: Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 106
Figura 66: Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 107
Figura 67: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6. 108
Figura 68: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10. 109
Figura 69: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.110
Figura 70: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 111
Figura 71: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 111
Figura 72: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.112
Figura 73: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 113
Figura 74: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 113
Figura 75: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.114
Figura 76: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 114
Figura 77: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 115
Figura 78: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.115
Figura 79: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 116
Figura 80: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 116
Figura 81: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.117
Figura 82: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 117
Figura 83: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 118

Figura 84: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.118
Figura 85: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 119
Figura 86: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 119
Figura 87: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.120
Figura 88: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 120
Figura 89: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 121
Figura 90: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.121
Figura 91: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 122
Figura 92: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 122
Figura 93: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.123
Figura 94: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 123
Figura 95: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 124
Figura 96: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.124
Figura 97: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 125
Figura 98: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo. 125
Figura 99: Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 126
Figura 100:Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 126
Figura 101:Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 127
Figura 102:Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 128

Figura 103:Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 129
Figura 104:Parâmetros iniciais para o cenário 3, considerando 20% de mudança do uso do solo no ambiente - 515 células. 131
Figura 105:Ambientes finais do SMA, no cenário 3, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6. 133
Figura 106:Ambientes finais do SMA, no cenário 3, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10. 134
Figura 107:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.135
Figura 108:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 135
Figura 109:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 136
Figura 110:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.136
Figura 111:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 137
Figura 112:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 137
Figura 113:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.138
Figura 114:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 139
Figura 115:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 139
Figura 116:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.140
Figura 117:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 140
Figura 118:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 141
Figura 119:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.141
Figura 120:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 142
Figura 121:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 142

Figura 122:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.143
Figura 123:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 143
Figura 124:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 144
Figura 125:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.144
Figura 126:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 145
Figura 127:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 145
Figura 128:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.146
Figura 129:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 146
Figura 130:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 147
Figura 131:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.147
Figura 132:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 148
Figura 133:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 148
Figura 134:Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.149
Figura 135:Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 149
Figura 136:Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo. 150
Figura 137:Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 150
Figura 138:Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 151
Figura 139:Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 151
Figura 140:Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 3, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 153

Figura 141:Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 3, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10. 154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos modelos hidrológicos e suas características. 32
Tabela 2: Propriedades de ambientes em SMAs. 37
Tabela 3: Processos da RSL. 41
Tabela 4: Protocolo da RSL: Principais tópicos. 42
Tabela 5: Protocolo da RSL: Bases de dados bibliográficas selecionadas. 43
Tabela 6: Protocolo da RSL: Organização das frases de busca. 44
Tabela 7: Protocolo da RSL: Seleção e análise dos estudos primários. 44
Tabela 8: Resultados da estratégia de seleção. 45
Tabela 9: Identificação dos trabalhos finais. 46
Tabela 10: Informações das estações hidrometeorológicas utilizadas neste estudo. . . . 51
Tabela 11: Valores referentes as variáveis hidrometeorológicas no período de 01/01/2001 a 31/12/2020. 52
Tabela 12: Parâmetros das classes de solo da BHAF. 54
Tabela 13: Percentual das classes de uso do solo na BHAF. 55
Tabela 14: Parâmetros do uso do solo. 55
Tabela 15: Área e tendência de mudança no uso do solo por sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata. 57
Tabela 16: Lista de sub-bacias por gestor em uma simulação com 10 agentes. 68
Tabela 17: Vazões mínimas simuladas, do último ano de referência, ao modificar toda a região da BHAF por um único uso do solo. 76
Tabela 18: Cenários de mudança no uso do solo para o modelo acoplado. 76
Tabela 19: Período de modelagem para a BHAF. 78
Tabela 20: Valores dos parâmetros calibrados para a BHAF. 78
Tabela 21: Valores dos parâmetros calibrados para a região da BHAF-PC, obtidos na literatura. 79
Tabela 22: Estatísticas de desempenho do modelo LASH para as etapas de calibração e validação. 80
Tabela 23: Vazões de referência da curva de permanência, vazões observadas e vazões estimadas na seção de controle "Passo dos Carros", da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC). 82
Tabela 24: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 89
Tabela 25: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 90
Tabela 26: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente. 104

Tabela 27: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 109
Tabela 28: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 110
Tabela 29: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 127
Tabela 30: Objetivos de mudança no uso do solo de acordo com as intenção dos agentes, definidas em cada simulação (S) do cenário 3, onde tem-se: A para agricultura; P para pastagem; S para silvicultura; e SE para solo exposto. 132
Tabela 31: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 132
Tabela 32: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 134
Tabela 33: Tentativas de mudança no uso do solo em cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 151
Tabela 34: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente. 152
Tabela 35: Respostas do primeiro trabalho. 174
Tabela 36: Respostas do segundo trabalho. 175
Tabela 37: Respostas do terceiro trabalho. 176

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Capacidade máxima de armazenamento de água por área foliar
α_s	Nível de significância
γ	Constante psicrométrica
δ	Declinação solar
Δ	Inclinação da curva de pressão de saturação do vapor de água
ΔA	Variação de armazenamento de água no solo
Δt	Variação do tempo
ε	Razão do peso molecular do vapor d'água por ar seco
θ_A	Quantidade atual de água no solo
θ_{PMP}	Umidade do solo no ponto de murcha permanente
θ_S	Umidade do solo no ponto de saturação
λ	Parâmetro calibrável de abstração inicial
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
φ	Latitude
ω_s	Ângulo horário ao nascer ou pôr do sol
a	Albedo
A_C	Geração de escoamento subterrâneo
A_{CAP}	Limite de disponibilidade de água no solo
A_{CC}	Geração de escoamento subsuperficial
A_L	Limite inferior de água armazenada no solo
A_M	Capacidade média de armazenamento de água no solo
A_{PMP}	Quantidade de água armazenada no ponto de murcha permanente
A_{sb}	Área de drenagem da sub-bacia hidrográfica
A_t	Armazenamento atual de água no solo no tempo t
C_B	Parâmetro calibrável da propagação do reservatório subterrâneo
C_{NS}	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
$C_{NS-\log}$	Coeficiente de Nash-Sutcliffe em sua versão logarítmica
C_{SS}	Parâmetro calibrável da propagação do reservatório subsuperficial
C_{SUP}	Parâmetro calibrável da propagação do reservatório superficial
CRI	Capacidade do reservatório de interceptação
d_r	Distância relativa inversa Terra-Sol
D_B	Lâmina de escoamento subterrâneo
D_{CAP}	Ascensão capilar
D_{SS}	Lâmina de escoamento subsuperficial
D_{SUP}	Lâmina de escoamento superficial
Dim	Dimensões das células no ambiente

e_a	Pressão atual do vapor d'água
e_s	Pressão de saturação do vapor d'água
E_P	Erro percentual entre Q_{min} e Q_{nc}
ET_C	Evapotranspiração de uma cultura
ET_P	Evapotranspiração potencial
ET_R	Evapotranspiração real
G	Fluxo de energia para o solo
G_{SC}	Constante solar
h	Altura da vegetação
h_{est}	Altura da estação meteorológica
H	Desnível do curso d'água principal da sub-bacia hidrográfica
H_0	Hipótese nula
H_a	Hipótese alternativa
HA	Quantidade total de hectares
I_a	Abstração inicial
IAF	Índice de área foliar
J	Número do dia no calendário Juliano
K_B	Parâmetro calibrável da condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo
K_{CAP}	Parâmetro calibrável da densidade de fluxo máxima de retorno por ascensão capilar
K_S	Coeficiente de umidade do solo
K_{SS}	Parâmetro calibrável da condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial
L	Comprimento do curso d'água principal da sub-bacia hidrográfica
LI_t	Lâmina de água armazenada no reservatório no tempo t
m	Total de dados em uma série histórica
M	Umidade antecedente
N	Número de ordenadas do hidrograma
P	Precipitação média descontada a interceptação
P_a	Pressão atmosférica
P_{BIAS}	Percentual de viés
P_C	Porcentagem de compra de um lote
P_V	Porcentagem de venda de um lote
Pr	Índice de porosidade do solo
$Prod$	Valor de produção de cada uso do solo
P_t	Precipitação total no tempo t
q	Quantidade de grupos vinculados

Q_B	Vazão de saída do reservatório linear subterrâneo
Q_{est_t}	Vazões estimadas no tempo t
Q_{obs_t}	Vazões observadas no tempo t
Q_{min}	Vazão mínima simulada
Q_{nc}	Vazão mínima necessária para mudança do uso do solo
Q_{SS}	Vazão de saída do reservatório linear subsuperficial
Q_{SUP}	Vazão de saída do reservatório linear superficial
r_a	Resistência aerodinâmica
r_s	Resistência estomática
R	Constante de gás específico
R_a	Radiação que atinge o topo da atmosfera
$RMSE$	Raiz quadrada do erro médio
R_n	Radiação líquida
R_{nl}	Radiação de ondas longas
R_{ns}	Radiação de ondas curtas
R_s	Radiação solar
R_{so}	Radiação de ondas curtas na ausência de nuvens
S	Armazenamento potencial de água no solo
S_{MK}	Teste estatístico
t_p	Quantidade de dados de uma série histórica na p-ésima posição
T	Temperatura do ar
T_c	Tempo de concentração
T_{Kv}	Temperatura virtual na escala Kelvin
T_{max}	Temperatura máxima na escala Celsius
$T_{max,K}$	Temperatura máxima na escala Kelvin
T_{min}	Temperatura mínima na escala Celsius
$T_{min,K}$	Temperatura mínima na escala Kelvin
U_{10}	Velocidade do vento a $10m$ da superfície
UR	Umidade relativa
v	Velocidade do vento média diária
v_{emp}	Velocidade do vento empregada
$V(x)$	Variância de x
V_0	Valor de venda de um lote
V_B	Volume no reservatório subterrâneo
V_{SS}	Volume no reservatório subsuperficial
V_{SUP}	Volume no reservatório superficial
V_C	Valor de compra de um lote
V_H	Valor de um hectare

V_M	Valor para mudança do uso do solo
V_V	Valor de venda de um lote
x_i	Valores do conjunto de dados de uma série histórica, onde $i = 1, ..., m$, e m o total de dados
z	Altitude
Z	Teste de hipótese do teste de Mann-Kendall
Z_{RAD}	Profundidade de enraizamento
Z_{SOLO}	Profundidade do solo

LISTA DE ABREVIATURAS

ArcLASH	Extensão do ArcGIS como módulo auxiliar do modelo LASH
CN	Curva-Número
CSG	Canal São Gonçalo
BHAF	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata
BHAF-PC	Região da BHAF a montante da seção de controle Passo dos Carros
BHMSG	Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo
ComMod	*The Companion Modelling approach*
GAMA	*GIS Agent-based Modeling Architecture*
GAML	*GAma Modeling Language*
GIS	*Geographic Information System*
GPRH	Projeto Gestão Participativa dos Recursos Hídricos Utilizando Jogos Computacionais e Sistemas Multiagente
IA	Inteligência Artificial
IDE	*Integrated Development Environment*
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IWRM	*Integrated Water Resources Management*
LASH	*Lavras Simulation of Hydrology*
MABS	*Multi-Agent Based Simulation*
MAS	*MultiAgent System*
MCV	Modelo Chuva-Vazão
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDE-HC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MK	*Mann-Kendall*
NA	*Not Available*
QE	Questão Específica
QP	Questão de Pesquisa
QQ	Questão de Qualidade
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RRM	*Rainfall-Runoff Model*
RPG	*Role-Playing Game*
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SCE, SCE-UA	*Shuffled Complex Evolution*
SMA	Sistema Multiagente
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission*
SYHDA	*System of Hydrological Data Acquisition and Analysis*

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é abordada a importância do tema da pesquisa apresentado neste trabalho, bem como sua justificativa e os resultados esperados. Esta introdução foi dividida em quatro partes, sendo elas: motivação; hipótese de pesquisa; objetivos; e estrutura do trabalho.

1.1 Motivação

A política, suas vertentes, e autoridades controlam boa parte das decisões acerca de setores públicos. Para exemplificar, alguns deles são a educação, a saúde e a assistência social, que são necessidades básicas de qualquer país e cultura. Entretanto, a gestão de recursos naturais é uma das áreas de maior importância política. Além desses recursos possuírem uma quantidade finita no planeta, e gerarem importantes contribuições em diversas atividades, são fundamentais para o controle mundial do clima, da fauna e da flora.

Ao longo dos anos, o planeta sofreu modificações em sua estrutura natural. Muitas delas foram consequências das mudanças na civilização, que além de promoverem espaços de urbanização e moradia, trouxeram avanços na cultura, educação, saúde e lazer. Por outro lado, a industrialização e o desmatamento foram alguns dos fatores que acarretaram em conflitos de interesses e ideais, gerando grandes problemas no gerenciamento de recursos naturais, em particular da água (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

No Brasil existe uma vasta diversidade e grande quantidade de recursos naturais, incluindo a água que é essencial para a sobrevivência de todos os seres vivos na Terra. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico[1] (ANA, 2020a), estima-se que o país possua cerca de 12% dos 2,5% de água considerada doce no planeta. Na Figura 1, pode-se observar que, da quantidade total de água doce, 69% correspondem a águas de difícil acesso, 30% de águas subterrâneas que estão armazenadas em aquíferos e apenas 1% é de águas que se encontram em rios, possibilitando o seu uso com fácil acesso.

As bacias hidrográficas disponibilizam a água necessária para diversos tipos de atividade. Devido ao relevo e geografia dessas regiões, o escoamento de água converge entre rios e seus afluentes até desaguar em um rio principal e, em seu único ponto de saída, o exutório, onde se tem toda a água captada pela bacia hidrográfica. Pode-se dizer então que a bacia hidrográfica constitui uma região que transforma precipitação em vazão, através dos processos hidrológicos (BRAS, 1990).

A hidrologia é a área de estudo sobre os fenômenos naturais do ciclo hidrológico, que considera a dinâmica desde as origens até os destinos da água no planeta (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Além de fornecer informações sobre os processos da água, a hidrologia pode gerar contribuições acerca da relação do uso da água com o meio ambiente e os seres vivos. Como consequência das mudanças ambientais geradas por ações naturais ou antrópicas, um

[1] https://www.gov.br/ana/pt-br

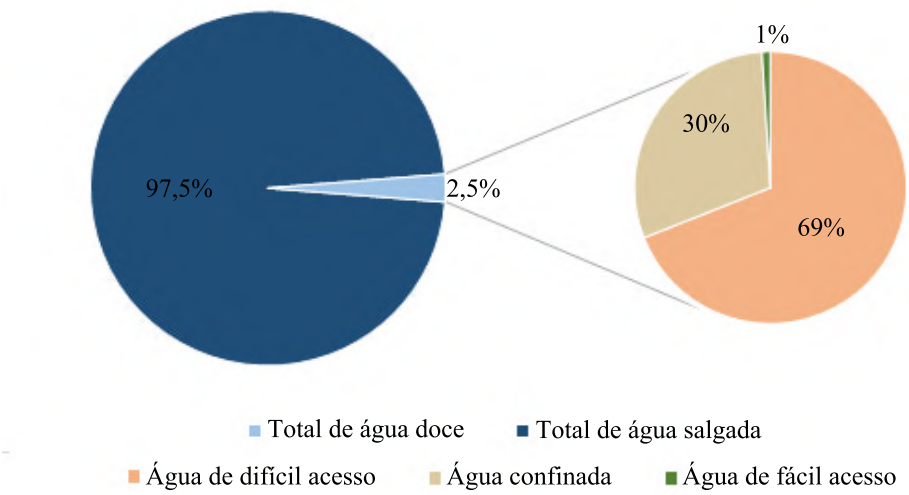


Figura 1: Gráficos do total de água no planeta.
Fonte: Autora.

aumento significativo dos problemas hidrológicos vêm ocorrendo, e gerando, muitas vezes, graves riscos à vida humana, ao meio ambiente e ao desenvolvimento econômico (SIMMONDS; GÓMEZ; LEDEZMA, 2020). Neste sentido, os sistemas hídricos são amplamente explorados com base em modelos de simulação, que visam fornecer informações ou gerar previsões acerca de alterações na dinâmica hidrológica de uma região.

Para prevenir ou resolver os problemas hidrológicos, muitas vezes, são exigidas técnicas que sejam capazes de descrever parte do sistema hidrológico, e que, além disso, simulem as consequências de ações humanas sobre uma determinada região hidrográfica (BARTHEL et al., 2008). Segundo POULADI et al. (2019), a tomada de decisão sobre o uso de recursos hídricos é considerada a principal responsável por alterações da condição e disponibilidade hídrica. Entretanto, devido ao grande número de dados e etapas de modelagem, os modelos que vinculam sistemas hidrológicos e sociais exigem a união de ferramentas voltadas as ciências físicas, ecológicas, sociais e econômicas (WASSON et al., 2003). Além disso, é importante que a modelagem seja realizada com vistas a contemplar sistemas coletivos, com base na negociação de diferentes atores sobre cenários distintos.

Existem muitas alternativas para o planejamento dos recursos hídricos, mas para que ele seja realizado de forma eficiente, deve-se utilizar metodologias que quantifiquem da melhor forma os processos relacionados a disponibilidade e preservação dos recursos (TUCCI, 2005). Alguns métodos recebem destaque ao relacionar sistemas sociais e hídricos. Um processo bastante conhecido é a gestão integrada de recursos hídricos (*Integrated Water Resources Management* - IWRM), que desde o início da década de 90 vem fornecendo métodos interdisciplinares, quantitativos e qualitativos, que auxiliam tomadores de decisão na gestão de recursos hídricos (LE PAGE; FAKIR; AOUISSI, 2020). Um outro método, definido como uma ciência chamada sócio-hidrologia, considera a coevolução dos sistemas hidrológicos e sociais, visando analisar as consequências da tomada de decisão, individual ou coletiva, sobre os sistemas hídricos (SIVA-

PALAN; SAVENIJE; BLÖSCHL, 2012).

Além disso, técnicas de Inteligência Artificial (IA) são muitas vezes utilizadas para auxiliar pesquisadores na compreensão de sistemas hídricos (KINGSTON; MAIER; DANDY, 2008). Sistema multiagente (SMA) é uma das técnicas de IA, e pode servir para simular sistemas adaptativos complexos através do comportamento de sistemas emergentes (BERGLUND, 2015). De forma geral, um SMA é composto por um conjunto de agentes autônomos que interagem entre si e com o ambiente em que estão inseridos, gerando consequências a cada ação dentro do sistema. Dessa forma, um SMA é considerado como uma abordagem *bottom-up* (de baixo para cima), ou seja, as instruções locais dos agentes geram comportamentos adaptativos que resultam no dinamismo do sistema (SIMMONDS; GÓMEZ; LEDEZMA, 2020). Além disso, a técnica que integra SMA e simulação é chamada Simulação Baseada em Multiagente (*Multi-Agent-Based Simulation* - MABS), e com ela pode-se gerar modelos sobre sistemas complexos interdisciplinares (ADAMATTI, 2007).

O projeto Gestão Participativa dos Recursos Hídricos Utilizando Jogos Computacionais e Sistemas Multiagente[2] (GPRH) foi elaborado em 2018, através de uma parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande, a Universidade Federal de Pelotas e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul. Os principais objetivos do projeto são desenvolver, formalizar e aplicar uma ferramenta, em formato de jogo, para auxiliar a tomada de decisão sobre os usos da água. Para isso, a técnica principal escolhida foi a abordagem chamada modelagem de acompanhamento[3] (*Companion Modelling* - ComMod). Esta técnica foi desenvolvida pelo grupo CIRAD (*Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement*), na França, com o intuito de gerar modelagens socioambientais, através da participação direta das partes envolvidas. A abordagem ComMod integra as técnicas de SMA e Jogos de Papéis (*Role-Playing Game* - RPG), visando modelar sistemas de gestão através de observações, coleta de dados e discussão sobre a tomada de decisão dos grupos ou pessoas envolvidas.

Em particular, o projeto GPRH visa realizar a aplicação piloto da ferramenta junto ao Comitê de Gerenciamento da Lagoa Mirim e do Canal São Gonçalo, o qual é responsável por organizar e planejar os usos da água dessa bacia. Algumas das etapas do projeto GPRH foram: a definição dos principais agentes, e suas ações e interações no contexto da bacia (LEITZKE et al., 2019); os primeiros passos para a análise sobre a modelagem da tomada de decisão da bacia (FARIAS et al., 2019, 2020); a busca pelos principais trabalhos envolvendo SMA e RPG no contexto da gestão de recursos naturais (FARIAS et al., 2019); a construção da modelagem do jogo computacional, chamado GORIM, envolvendo SMA e RPG (LEITZKE et al., 2019; MARTINS; ADAMATTI, 2021) e; a análise de estratégias e dados sobre o RPG desenvolvido (MOTA et al., 2020, 2021; BORN et al., 2022).

Algumas das necessidades do projeto GPRH são a caracterização, a modelagem e o projeto de cenários para a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG). Além disso, pretende-se

[2]http://gprh.c3.furg.br/
[3]https://www.commod.org/en

explorar a tomada de decisão sobre os recursos hídricos desta bacia. Uma alternativa para desenvolver esses processos é utilizar um SMA para a modelagem social, e um modelo hidrológico para descrever o comportamento da BHMSG. Os modelos hidrológicos são modelos matemáticos muito utilizados para descrever o comportamento dos processos hídricos de forma simplificada. Em particular, o uso de um modelo chuva-vazão (MCV) tem como principal objetivo calcular e descrever de forma precisa a vazão, a partir dos processos hidrológicos, como a precipitação, a evapotranspiração e o escoamento (HROMADKA, 1990). Esse tipo de modelo vem sendo amplamente utilizado, tanto para fins de pesquisa, bem como uma ferramenta de simulação e previsão (MORADKHANI; SOROOSHIAN, 2008). Pesquisadores desenvolveram e aprimoraram esses modelos, com o intuito de melhorar o conhecimento e o entendimento a respeito dos processos físicos hidrológicos envolvidos em sistemas hídricos. Além disso, muitos estudiosos investigam a tomada de decisão referente à gestão de recursos hídricos, para analisar as consequências, gerar previsões e determinar planos eficazes de uso da água (BARTHEL et al., 2008; SCHREINEMACHERS; BERGER, 2011; BERGLUND, 2015; HERRERA; ALVES, 2018; POULADI et al., 2019).

Do que se observa na literatura, o uso conjunto de SMA e MCV pode fornecer mecanismos para desenvolver modelos com o intuito de gerar respostas a sistemas hídricos com base na modelagem social e hidrológica. Por essa integração gerar uma metodologia híbrida, os resultados tendem a ser melhores quanto à precisão, tempo e escala (TAN et al., 2020). Nesse sentido, este trabalho busca gerar uma contribuição ao projeto GPRH, a partir do desenvolvimento de uma modelagem acoplada utilizando MCV e SMA para compreender os processos de gestão da BHMSG. Para isso, escolheu-se como região de estudo a Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata (BHAF). A BHAF está inserida na BHMSG e possui um banco de dados hidrológicos, temporais e espaciais disponível, possibilitando o acoplamento dos modelos social e hidrológico. A partir desse estudo, pode-se estender os resultados as demais regiões da BHMSG.

Segundo TUCCI (2005), um modelo é uma ferramenta que visa representar, em linguagem simples, um sistema ou um objetivo, onde se busca compreender seu comportamento e suas soluções a partir de diferentes entradas. Assim, o processo de modelagem deste trabalho foi realizado em três momentos. A primeira etapa é voltada a modelagem hidrológica. O segundo momento é direcionado ao processo de desenvolvimento do SMA. E, por fim, o modelo acoplado é obtido através da relação entre os dois modelos, onde os dados do MCV serão considerados como entrada para o SMA, e vice-versa.

Neste trabalho, o modelo hidrológico chuva-vazão *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) (CALDEIRA et al., 2019) foi escolhido para calibrar, validar e simular as vazões da BHAF, diante de cenários de mudança no uso do solo. Esse modelo vem sendo explorado e analisado em diversas aplicações, que consideram bacias hidrográficas de diferentes tamanhos, biomas e condições edafoclimáticas (MELLO et al., 2008; BESKOW et al., 2011; BESKOW; MELLO; NORTON, 2011; BESKOW; NORTON; MELLO, 2013; VIOLA et al., 2013, 2014; BESKOW et al., 2016; CALDEIRA et al., 2019; VARGAS, 2021). Além de ser idealizado pelo princípio da parcimônia, ele é considerado um modelo semiconceitual, determinístico, semidistribuído

e contínuo. Neste trabalho, o desenvolvimento da modelagem da bacia utilizando LASH foi realizado com auxílio e suporte técnico do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas[4], da Universidade Federal de Pelotas. Além do uso do LASH para estudos direcionados à bacias hidrográficas, o grupo vem desenvolvendo algumas ferramentas de suporte ao modelo. Como exemplo, tem-se os softwares *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA) (VARGAS et al., 2019) e ArcLASH, que foram utilizados neste trabalho para a constituição, tratamento ou ajuste do banco de dados.

Já o SMA foi desenvolvido e simulado com o objetivo de analisar as ações de agentes usuários de água da bacia. Para este processo foi utilizada a plataforma *GIS Agent-based Modeling Architecture* (GAMA) (TAILLANDIER et al., 2019), que é uma ferramenta de desenvolvimento de modelagem e simulação de SMA. A plataforma possui linguagem de alto nível própria, chamada *GAma Modeling Language* (GAML), baseada em JAVA. E, além disso, é uma ferramenta de suporte para dados de sistemas de informações geográficas (*Geographic Information System* - GIS), o que possibilita analisar modelos sobre gestão de recursos naturais, e facilita o processo de simulação.

Para acoplar o SMA e o modelo LASH, o ambiente foi determinado através dos mapas da BHAF, de subbacias e do uso do solo. A região é composta por sete usos do solo, a saber: mata nativa, silvicultura, campo nativo, pastagem, agricultura, solo exposto e água. A discretização espacial do SMA em GAMA foi realizada a partir da implementação de uma malha de células quadradas sobre o ambiente, de forma que em cada célula fossem definidos o uso do solo, a subbacia e um agente responsável pela região. Os agentes foram definidos como gestores, ou ainda, entidades ou organizações responsáveis pela mudança no uso do solo da bacia. Eles podem modificar o uso do solo em cada célula do ambiente, a cada passo de simulação, a partir de algumas regras estabelecidas. Além disso, os agentes podem negociar os lotes, representados pelas células do ambiente. Para isso, alguns atributos foram considerados, como saldo, produção e taxas.

O modelo LASH possui passo de simulação diário, podendo fornecer vazões ao longo de uma sequência de anos. Dessa forma, o SMA foi desenvolvido com escala de tempo mensal, sendo atualizado a cada etapa de simulação. Passados 12 ciclos, a simulação gera um arquivo atualizado com a média dos atributos do uso do solo por sub-bacia, a saber: resistência estomática, altura da vegetação, índice de área foliar, albedo e profundidade do sistema radicular. Nesse momento, o modelo LASH gera novas vazões para o período de simulação. As vazões mínima, média e máxima são atualizadas no SMA, gerando modificações nas ações dos agentes.

No SMA são estipulados valores de custo de alteração do uso do solo e a vazão mínima necessária para que isso ocorra. Os agentes gestores possuem um saldo disponível para mudança no uso do solo, e devem cumprir as regras. Neste trabalho, buscou-se analisar como as ações dos agentes influenciam na BHAF, isto é, qual o impacto da mudança no uso do solo a partir das ações e negociações dos agentes gestores. Para isso, alguns cenários de mudança no uso do solo foram definidos, bem como regras que seguem a tendência de mudança no uso do solo.

[4]https://wp.ufpel.edu.br/hidrologiaemodelagemhidrologica/

As subseções seguintes servem para nortear as etapas da pesquisa. Primeiramente, a hipótese de pesquisa é explicitada. Na sequência, estão definidos os objetivos geral e específicos. Por fim, está um breve resumo sobre cada capítulo deste trabalho.

1.2 Hipótese de pesquisa

A modelagem hidrológica chuva-vazão descreve o comportamento de variáveis do ciclo hidrológico através do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. Por outro lado, o sistema multiagente, voltado à gestão de recursos hídricos, descreve o comportamento da tomada de decisão de usuários de uma bacia, diante da disponibilidade, da demanda de água na região e possibilidade de mudança no uso do solo. Dessa forma, o modelo desenvolvido através do acoplamento de um MCV e um SMA descreve o comportamento da bacia hidrográfica com relação ao uso e demanda dos usuários e da região.

Neste trabalho, pretende-se mostrar que a integração dinâmica de um MCV e um SMA gera o comportamento do sistema sócio-hidrológico da bacia, no caso, da BHAF, identificando de forma lúdica e direta os principais impactos hidrológicos gerados a partir de diferentes cenários de mudança no uso do solo. Além disso, busca-se mostrar que o MCV acoplado ao SMA gera uma ferramenta de análise e projeção da tomada de decisão sobre a mudança no uso do solo para a bacia BHAF, podendo ser estendido a outras regiões.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é formalizar, desenvolver e simular um modelo acoplado sócio-hidrológico para gestão de recursos hídricos, utilizando as técnicas de sistemas multiagente e modelagem hidrológica chuva-vazão.

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos se resumem em:

- Simular as vazões na BHAF através do modelo LASH;
- Simular a mudança no uso do solo na BHAF, a partir do SMA desenvolvido em GAMA;
- Simular as negociações dos agentes no SMA, voltadas a mudança no uso do solo;
- Acoplar o SMA ao modelo LASH, de forma a obter uma retroalimentação dependente de ambos os sistemas;
- Determinar e simular os cenários de mudança no uso do solo para a região de estudo;
- Verificar a capacidade de simular o sistema sócio-hidrológico utilizando LASH e GAMA;
- Analisar os resultados obtidos para compreender os impactos de cada cenário nas duas ferramentas, SMA e MCV.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, como segue:

1. No Capítulo 1 está a presente introdução do trabalho. Nela estão contidos a motivação, a hipótese de pesquisa, os objetivos e esta estrutura de organização.

2. O embasamento teórico sobre o tema de pesquisa é apresentado no Capítulo 2. Mais precisamente, são explorados os métodos de sistemas multiagente e modelagem hidrológica chuva-vazão, com o intuito de analisar os processos envolvidos no desenvolvimento desses sistemas voltados à problemas de gestão de recursos hídricos. Além disso, uma revisão sistemática da literatura é apresentada como método, para determinar e analisar os principais trabalhos que utilizam conjuntamente SMA e MCV.

3. A metodologia e os materiais utilizados no trabalho são apresentados no Capítulo 3. Em um primeiro momento, é apresentada a região de estudo do trabalho, bem como sua importância e principais características. Além disso, são apresentados os banco de dados temporais e espaciais utilizados na modelagem. A partir disso, são discutidas detalhadamente as técnicas escolhidas para a modelagem acoplada, bem como a organização e sequência das etapas envolvidas no desenvolvimento do trabalho. Dessa forma, o modelo hidrológico chuva-vazão LASH e o SMA são apresentados de forma detalhada. Ao final deste capítulo apresenta-se as técnicas utilizadas para o acoplamento do MCV e do SMA, e a definição dos cenários de mudança no uso do solo.

4. No Capítulo 4, tem-se os resultados obtidos a partir da metodologia e dos métodos apresentados. Na primeira parte, apresenta-se os resultados da calibração e validação do modelo LASH. Em um segundo momento, tem-se os resultados dos cenários de mudança no uso do solo para o modelo acoplado sócio-hidrológico.

5. As considerações finais são apresentadas no Capítulo 5. Nessa parte, são relatados os objetivos atingidos, contribuições da pesquisa, as conclusões obtidas e alguns desafios encontrados ao longo deste trabalho. Menciona-se também as possibilidades de expansão dos resultados obtidos a outras regiões de estudo, bem como possíveis trabalhos futuros.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Na introdução, a hipótese de pesquisa, bem como os objetivos deste trabalho foram apresentados. Para resolver o problema de pesquisa, o embasamento teórico serve como fonte de referências, experiências e análises sobre os conceitos e o uso conjunto de SMA e MCV.

2.1 Modelos hidrológicos

Segundo TUCCI (2012), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. Uma ilustração desse fenômeno é apresentada na Figura 2. Este ciclo consiste na dinâmica da água, em seus diferentes estados físicos, sobre diferentes ambientes do globo terrestre (MELLO; SILVA, 2013). E a hidrologia é a área de estudo sobre os fenômenos naturais do ciclo hidrológico, considerando as origens e destinos da água no planeta (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; BRAS, 1990).

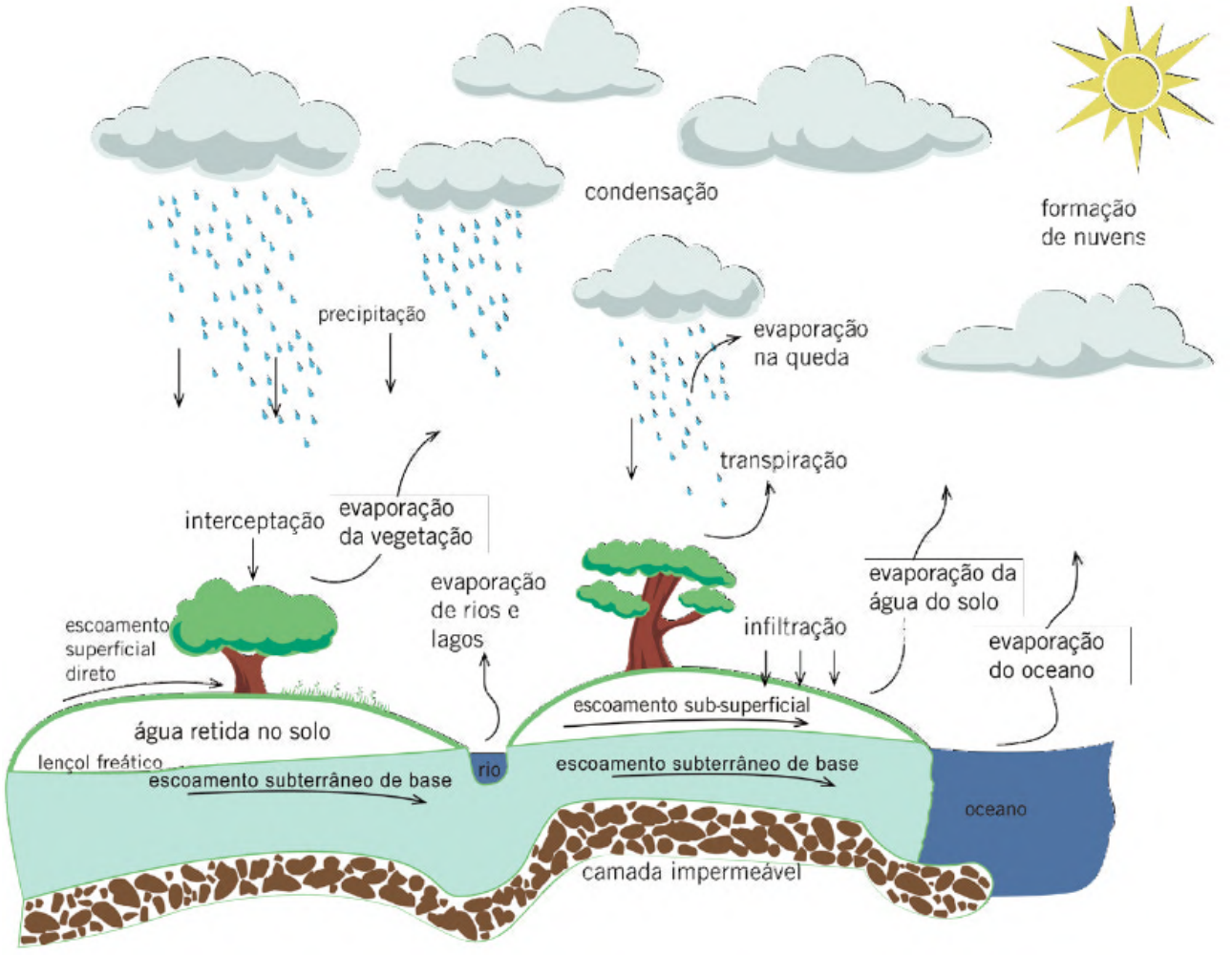


Figura 2: Representação do ciclo hidrológico.
Fonte: BESKOW; SOUZA; LUZ (2015).

Modelos hidrológicos foram desenvolvidos para que cientistas pudessem compreender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2005). A modelagem de uma bacia hidrográfica envolve a representação dos processos físicos hidrológicos, onde a entrada do modelo é dada pela precipitação e a saída como a vazão no exutório (ou seção de controle) da bacia, sendo o ciclo hidrológico o processo de mecanismo do sistema. Um modelo hidrológico consiste em um modelo matemático que descreve o comportamento do fluxo de água em uma determinada região hidrográfica, e visa parametrizar os processos hidrológicos e suas interações no sistema (CLARK et al., 2017). Da literatura, sob diferentes aspectos, um modelo pode ser classificado basicamente dentre seis categorias que são exibidas na Tabela 1.

Classificação	Característica
Estacionário ou Dinâmico	Dependência temporal ou não
Linear ou Não Linear	Princípio da superposição satisfeito ou não
Estocástico ou Determinístico	Tipo de variáveis utilizadas
Discreto ou Contínuo	Período de simulação
Empírico ou Conceitual	Tipo de formulação
Concentrado ou Distribuído	Dependência espacial ou não

Tabela 1: Classificação dos modelos hidrológicos e suas características.

Um modelo é dito estacionário quando em sua formulação não é considerada a dependência temporal nas variáveis e parâmetros utilizados (ALMEIDA; SERRA, 2017). Quando existe essa dependência o modelo é dito dinâmico. Em um aspecto físico, para CHENG (1959), uma condição necessária para um sistema ser linear é que o princípio da superposição seja satisfeito. Isso significa que a presença de uma entrada não afeta as respostas devido a outras entradas no sistema. Do contrário, o sistema é considerado não-linear.

Dependendo do tipo de variável utilizada, um modelo pode ser estocástico ou determinístico (CALDEIRA et al., 2018). Um modelo é dito estocástico quando a chance de ocorrência das variáveis envolvidas são implementadas em sua formulação através de conceitos de probabilidade. Ou ainda, para um mesmo conjunto de entrada, o modelo produz valores diferentes de saída. E um modelo é determinístico quando segue uma lei definida para cada variável, produzindo respostas idênticas para o mesmo conjunto de entrada, mesmo se uma das variáveis de entrada for aleatória.

Como os processos do sistema hidrológico variam de forma contínua no espaço e no tempo, é necessário discretizar as variáveis do modelo. E essa discretização é definida com base no grau de acurácia desejado para o modelo (CALDEIRA, 2016). Os modelos discretos são aqueles que simulam eventos isolados de uma série histórica de duração relativamente curta. Por outro lado, os modelos contínuos podem simular longos períodos do ano hidrológico ou períodos sazonais (DHAMI; PANDEY, 2013).

Os modelos podem ser classificados segundo seu tipo de formulação, ou seja, tipo de relação entre as variáveis. Em modelos conceituais são utilizadas equações que descrevem de forma idealizada os fenômenos e processos hidrológicos do sistema (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Esses modelos podem ser subdivididos em físicos ou semiconceituais. Quando são con-

sideradas equações diferenciais do sistema físico, os modelos são ditos conceituais físicos, e são os que mais se aproximam da realidade. Já os modelos semiconceituais são ou mais utilizados, pois neles são relacionadas características do processo, e os parâmetros das equações são razoavelmente empíricos. Mas, neste caso, os modelos não necessariamente se baseiam em processos reais (CALDEIRA et al., 2018). Nos modelos empíricos são utilizadas equações matemáticas derivadas de séries temporais, simultâneas de dados de entrada e saída, podendo ser obtidas através de relações funcionais. Assim, não são considerados os processos físicos do sistema.

Os modelos ditos concentrados são os que não consideram a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no sistema. Neles, os parâmetros, as entradas e as saídas são valores médios únicos que visam representar a bacia de forma única, ou seja, não são consideradas as variações espaciais das características físicas do relevo, solo e vegetação da região. Nos modelos distribuídos são realizadas divisões em unidades espaciais, irregulares ou regulares homogêneas, em toda a área da bacia. Dessa forma, é considerada a variação espacial das variáveis e parâmetros (TUCCI, 2005). Como os modelos concentrados tendem a não representar de forma realística uma bacia e, por outro lado, os modelos distribuídos podem gerar um grande gasto computacional, além de necessitar de muitos dados de entrada, modelos semidistribuídos foram desenvolvidos. Neles a bacia é dividida em sub-bacias e em cada uma delas é considerado um modelo concentrado (MELLO et al., 2016).

Resumidamente, o processo de simulação de um modelo hidrológico é realizado a partir das seguintes etapas: concepção, calibração e validação. O processo de definição corresponde ao objetivo da modelagem e a escolha adequada do modelo. Ou seja, o que se pretende simular e quais as variáveis necessárias a serem modeladas, considerando qualidade e disponibilidade dos dados para a etapa de calibração e funcionamento do modelo (CALDEIRA, 2016).

A fase de estimativa é quando são determinados os principais parâmetros do modelo. Nesse processo, é analisada a relação entre a alteração do valor e a influência que diferentes parâmetros exercem na resposta de uma variável de saída, onde os que exercem maior mudança sobre o modelo são escolhidos para a etapa de calibração. Através de uma análise de sensibilidade, pode-se encontrar alguns parâmetros desconhecidos ou indiretamente mensuráveis. Com o intuito de representar de forma mais realística os processos físicos do sistema, a calibração do modelo visa ajustar esses parâmetros de entrada, refinando seus valores para um determinado conjunto de condições locais a partir dos dados observados.

A verificação é a fase de validação dos parâmetros onde, a partir de um novo conjunto de dados e com os parâmetros ajustados e determinados, é realizada a simulação do modelo. Nessa etapa tem-se como objetivo analisar a acurácia da simulação por meio de um método que deve ser escolhido a partir do objetivo do modelo. Dentre eles, os mais utilizados são os métodos estatísticos e os de comparação gráfica. E por fim, na etapa de previsão é realizada a simulação com os parâmetros já ajustados e verificados, para que sejam representadas saídas a partir de diferentes entradas no modelo (TUCCI, 2005).

Modelos hidrológicos vêm sendo utilizados para diversas finalidades, e ainda, se diferenciam a partir de fatores como dados de entrada, forma de discretização dos dados, e prioridades da

modelagem. Alguns exemplos de uso de modelos hidrológicos são (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015): análise quantitativa e qualitativa da água; prevenção de inundações e cheias; gerenciamento adequado de recursos hídricos; preenchimento de falhas em séries hidrológicas; construção de séries históricas de vazão em cursos d'água não monitorados; avaliação da erosão e sedimentação; avaliação do impacto das mudanças climáticas e de uso do solo sobre os recursos hídricos. No modelo hidrológico são consideradas equações matemáticas que descrevem os fenômenos como precipitação e vazão. Mas para que os parâmetros sejam utilizados de forma correta, são necessários dados históricos, medições de amostras e determinação das características físicas do sistema (TUCCI, 2005).

Particularmente, um modelo chuva-vazão visa descrever quantitativamente os processos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica (CALDEIRA et al., 2019). De acordo com WASSON et al. (2003), dentre os usos desse modelo, três merecem destaque: gestão do reservatório; detecção de impactos humanos; e previsão de vazão. O primeiro objetivo visa prever o comportamento da bacia com base na quantidade de água disponível da mesma. Já o segundo uso se refere aos impactos não ocasionados de forma natural sobre a bacia, onde os dados de entrada do modelo devem ser considerados dados forçantes. Com isso, o modelo chuva-vazão tende a auxiliar na detecção das consequências sobre as ações antrópicas, mas necessita de um cuidado quanto a precisão do modelo. O último objetivo, sobre o uso da modelagem chuva-vazão, se refere ao tempo favorável de execução para gerar a previsão da disponibilidade hídrica de uma região.

Muitos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são desenvolvidos com diferentes características e propriedades, e são explorados para atingir diferentes objetivos. Alguns deles são *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL) (BEVEN et al., 1984); *European Hydrological System* (ou *Système Hydrologique Européen* - MIKE SHE) (ABBOTT et al., 1986), *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998); Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN et al., 2007); e *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) (CALDEIRA et al., 2019).

2.1.1 Modelo hidrológico chuva-vazão LASH

Segundo CALDEIRA et al. (2018), dado um sistema real natural ou artificial, um modelo é uma forma de representação desse sistema. E para se obter um modelo eficiente, ele deve fornecer um bom comportamento do sistema, mas com o mínimo possível de parâmetros calibráveis, visto que a má interpretação destes dados reflete em possíveis erros na modelagem (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). A essa ideia dá-se o nome de princípio da parcimônia, e muitos modelos o utilizam com o intuito de reduzir incertezas sobre o modelo (TUCCI, 2005).

O modelo hidrológico chuva-vazão LASH foi escolhido para representar o comportamento hidrológico da BHAF neste trabalho. Além de satisfazer o princípio da parcimônia, ele vem sendo aplicado em muitas bacias hidrográficas brasileiras de diferentes tamanhos e características (MELLO et al., 2008; BESKOW; MELLO; NORTON, 2011; BESKOW et al., 2011; BESKOW;

NORTON; MELLO, 2013; VIOLA et al., 2013, 2014; BESKOW et al., 2016; CALDEIRA et al., 2019; VARGAS, 2021). LASH é considerado um modelo semiconceitual, determinístico, semi-distribuído, e de longo termo, e possui quatro versões.

LASH foi desenvolvido em parceria entre a Universidade Federal de Lavras e a Universidade Purdue, onde o modelo era semidistribuído e desenvolvido (em formato `.xlsx`) (VIOLA, 2008). Seu primeiro aprimoramento foi realizado por BESKOW (2009), onde o modelo foi desenvolvido em linguagem Delphi, com uma discretização espacial por células de grade regulares, e com um módulo de calibração automática com base no método de otimização global *Shuffled Complex Evolution* (SCE) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). A terceira versão do modelo foi melhorada através do acoplamento de módulos específicos para o esquema semidistribuído, possibilitando gerar o processamento de bancos de dados temporal e espacial (CALDEIRA, 2016). Além disso, foram adaptadas a rotina hidrológica e o módulo de calibração automática com o algoritmo SCE.

Recentemente, sua quarta versão foi desenvolvida (VARGAS et al., 2020; VARGAS, 2021), onde o modelo LASH foi implementado em ambiente Matlab® (MATrix LABoratory). Nas três primeiras versões do modelo LASH, o método de Muskingum-Cunge Linear (TUCCI, 2005) foi utilizado para descrever o comportamento da propagação de vazões em rios. Na quarta versão, esse processo foi modificado, onde utilizou-se o modelo da Onda Cinemática (LIGHTHILL; WHITHAM, 1955a,b), do qual é considerado hidráulico e menos complexo. Além disso, com vistas a melhorar o desempenho e a representação física dos processos hidrológicos, o modelo LASH foi testado com base em uma abordagem multiobjetivo de calibração dos parâmetros. Para isso, foram utilizados os métodos SCE e o AMALGAM (*A Multi-Algorithm Genetically Adaptive Multiobjective*)(VRUGT; ROBINSON, 2007). Na Seção 3.2, a metodologia do modelo LASH, bem como sua rotina hidrológica, são apresentados.

2.2 Sistemas multiagente

Um agente pode ser definido como uma entidade computacional de processamento de informação, que percebe seu ambiente através de sensores e age sobre ele a partir de estímulos, para atingir objetivos (RUSSELL; NORVIG, 2002; WOOLDRIDGE, 2002). Na Figura 3, tem-se uma ilustração da relação do agente e seu ambiente. O agente recebe a entrada sensorial do ambiente, delibera sobre suas percepções, e produz ações como saída, afetando o ambiente e gerando mais um ciclo. Conforme percepções e respostas das interações no sistema, o agente toma decisões de forma autônoma, isto é, reage a partir de características e regras pré estabelecidas, e de entradas externas (CROOKS; HEPPENSTALL, 2012). Nesse sentido, o principal desafio do agente é determinar qual será a melhor escolha de ação diante de diferentes cenários, visando atingir seus objetivos.

Segundo CROOKS; HEPPENSTALL (2012), as interações entre os agentes causam impactos que podem gerar modificações em diferentes escalas, tanto espaciais como temporais. Dessa forma, para que as interações obtenham sucesso, os agentes devem ser capazes de se comunicar,

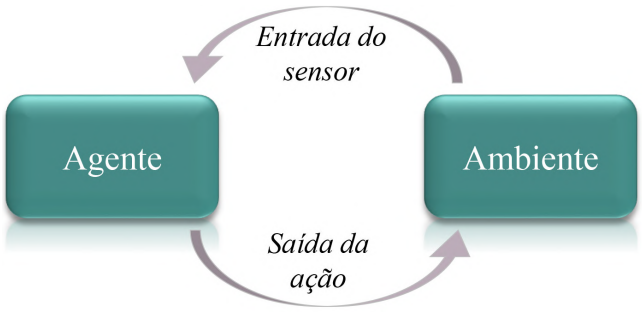


Figura 3: Visão abstrata de um agente em seu ambiente.
Fonte: Adaptado de WOOLDRIDGE (2002).

cooperar, coordenar e negociar entre si para atingir um objetivo comum ou individual dentro do sistema (WOOLDRIDGE, 2002).

Para a realização e organização interna de cada agente em um SMA, utiliza-se uma arquitetura de agentes (ADAMATTI, 2007). Através dela, são determinadas as estruturas da percepção, dos desejos e das intenções dos agentes. Existem duas abordagens principais que normalmente são utilizadas como arquiteturas, que são a reativa e a cognitiva. E uma terceira abordagem foi desenvolvida na tentativa de reunir as duas primeiras, onde essa é denominada abordagem híbrida (DROGOUL; MICHEL; FERBER, 2009). Assim, tem-se:

- Arquitetura reativa: é baseada em arquiteturas de percepção-ação (ou estímulo-resposta). Os agentes percebem e interagem unicamente com o ambiente, que para eles não possui representação explícita, assim como outros agentes. Além disso, os agentes reativos não possuem memória passada ou projeção das ações futuras.

- Arquitetura cognitiva: é baseada em arquiteturas estruturadas através do raciocínio. Os agentes percebem, interagem e possuem uma representação explícita do ambiente e de outros agentes. Neste caso, os agentes possuem memória, raciocínio e capacidade de planejar ações.

- Arquitetura híbrida: é baseada nas arquiteturas reativa e cognitiva. Os agentes são divididos entre reativos e cognitivos, e as decisões dos grupos distintos se complementam. Além disso, os agentes lidam de forma independente diante dos aspectos reflexo (reativo) ou reflexivo (cognitivo).

Um sistema multiagente é um modelo computacional composto de um ambiente (que pode ser físico, social, ou qualquer outro meio de interação), e agentes que interagem entre si e/ou com o próprio ambiente, e que possuem objetivos e motivações diferentes (FAROLFI; MÜLLER; BONTÉ, 2010). Dessa forma, os SMA auxiliam na construção de modelos com capacidade de operar de forma independente e de representar os interesses e ações dos agentes em um ambiente comum, bem como as consequências geradas por suas ações (WOOLDRIDGE, 2002). Quando um SMA é simulado computacionalmente, chamamos essa técnica de Simulação Baseada em

Multiagente (*Multi-Agent-Based Simulation* - MABS), e com ela pode-se modelar sistemas complexos que contém múltiplos domínios (ADAMATTI, 2009).

Os processos para a construção de um MABS estão ilustrados na Figura 4. O modelo dinâmico é construído a partir de uma questão sobre um sistema real. Visando solucionar esse problema, uma modelagem teórica é definida e programada computacionalmente, gerando simulações. Assim, o modelo passa por um processo de experimentação através das simulações. E então, as simulações são avaliadas em dois processos, gerando a verificação e validação do modelo. Primeiro, são interpretadas as simulações com base no modelo dinâmico, para verificar erros ou falhas. Depois, as simulações são comparadas ao sistema real através de dados e observações.

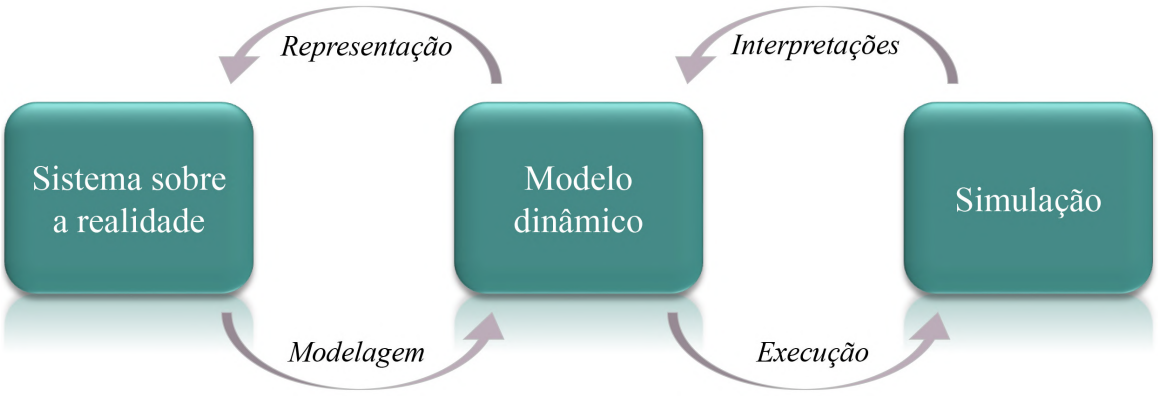


Figura 4: Representação das etapas da simulação baseada em multiagente.
Fonte: Adaptado de WOOLDRIDGE (2002) e ADAMATTI (2007).

O ambiente escolhido para o SMA é o espaço de interação, ou seja, é onde os agentes estão inseridos, agem e interagem entre si ou com o próprio meio. Algumas mudanças ocorrem através da tomada de decisão dos agentes, em cada etapa de simulação. Dessa forma, o ambiente se modifica e as percepções sobre ele são atualizadas para os agentes. Este ciclo se repete até que o programador determine a parada da simulação. As propriedades do ambiente determinam as características que o SMA pode ou não ter. Na Tabela 2 estão as principais propriedades que um ambiente pode ou não possuir, segundo RUSSELL; NORVIG (2002).

Classificação	Característica
Acessível ou inacessível	Acesso à informação ou não
Determinístico ou não determinístico	Ação e efeito entre as etapas
Episódico ou não episódico	Perspectiva entre as etapas
Estático ou dinâmico	Dependência temporal ou não
Discreto ou contínuo	Quantidade de percepções e ações definidas

Tabela 2: Propriedades de ambientes em SMAs.

Um ambiente é dito acessível quando um agente do sistema possui informações completas, precisas e atualizadas sobre as condições do ambiente. Isso significa que o ambiente é efetivamente acessível quando os sensores do agente detectam as informações necessárias e su-

ficientes para a tomada de decisão. Do contrário, o ambiente é dito inacessível. Os ambientes determinísticos são aqueles em que uma ação tem apenas um único efeito. Por outro lado, os ambientes são chamados não determinísticos. Assim, observa-se que sendo um ambiente determinístico e acessível não há incerteza sobre o resultado das ações dos agentes. Entretanto, quando o ambiente é determinístico, mas inacessível, os agentes podem tomar decisões baseados em percepções errôneas.

RUSSELL; NORVIG (2002) definem um ambiente episódico como aquele em que as experiências dos agentes são separadas em episódios. Isto é, em uma etapa da simulação os agentes percebem o ambiente e agem sobre o estado em que se encontram. Dessa forma, a qualidade das ações dos agentes necessitam apenas da percepção do estado atual, tendo em vista que os agentes não necessitam pensar em cenários futuros. Quando o agente possui memória e percepções futuras, o ambiente é dito não episódico.

Um ambiente é considerado estático quando se modifica apenas entre as etapas por meio das ações dos agentes. Quando o ambiente se modifica enquanto os agentes estão deliberando, ele é dito dinâmico. E ainda, se o ambiente não se modifica durante a tomada de decisão dos agentes, mas os valores associados ao desempenho dos agentes se alteram, o ambiente é semidinâmico. Por fim, um ambiente é discreto quando existe um número finito e fixo de ações e percepções definidas e relacionadas aos agentes. Quando esse conjunto varia em tamanho e informação, o ambiente é considerado contínuo.

Os ambientes de SMA podem ser modelados e simulados em diversas ferramentas. Algumas dessas plataformas de simulação baseada em multiagente são: NetLogo (TISUE; WILENSKY, 2004); CORMAS (LE PAGE et al., 2000); GAMA (TAILLANDIER et al., 2019); e JaCaMo (BOISSIER et al., 2011), que integra as tecnologias Jason (para programar de agentes autônomos) (BORDINI; HÜBNER; WOOLDRIDGE, 2007), CArtAgO (para programar mecanismos de ambiente) (RICCI et al., 2009) e Moise (para programar organizações multiagentes) (HÜBNER; SICHMAN; BOISSIER, 2007).

2.2.1 Plataforma GAMA

Neste trabalho, a ferramenta escolhida para modelar e simular o SMA proposto foi a plataforma GAMA, da qual é considerada como um ambiente de desenvolvimento de modelagem e simulação para a construção de simulações baseadas em agentes. Ela foi desenvolvida como um projeto de código aberto pelas equipes internacionais da *Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes* no *Institut de Recherche pour le Développement* da *Université Pierre et Marie Curie*.

GAMA foi baseada na ferramenta Eclipse, da qual é uma IDE (*Integrated Development Environment*), e possui linguagem de programação própria chamada *GAma Modeling Language* (GAML), que é codificada através do ambiente computacional Java. Sua última versão pode ser baixada gratuitamente[5] ou construída a partir do código-fonte. A plataforma disponibiliza

[5]https://gama-platform.github.io/

vários modelos em sua biblioteca, tutoriais de utilização e uma documentação online completa.

Os SMA em GAMA podem ser construídos utilizando diferentes tipos de conjuntos de dados, através de um ambiente de desenvolvimento integrado. A ferramenta possibilita incluir dados de sistemas de informações geográficas (*Geographic Information System* - GIS), ou seja, armazena a geometria e os atributos dos dados terrestres projetados cartograficamente. Nesse contexto, alguns trabalhos utilizaram a plataforma GAMA para modelar sistemas multiagente envolvendo processos hidrológicos (GAUDOU et al., 2014; LARDY et al., 2014; FARIAS et al., 2020; VICARIO et al., 2020; MARIANO; ALVES, 2020).

2.2.2 Uso de SMA em problemas hidrológicos

No contexto hidrológico, normalmente um SMA pode ser modelando considerando dois tipos diferentes de agentes. No primeiro caso, os agentes do sistema são considerados como regiões do ambiente de estudo, como os rios ou as regiões hidrográficas (FARIAS et al., 2020). Neste caso, o SMA modela e simula essas regiões com base nas mudanças de parâmetros do sistema, e nas interação entre os agentes. Em um segundo caso, os agentes são considerados personagens que possuem comportamentos similares aos de humanos, que utilizam e negociam recursos hídricos (FAROLFI; MÜLLER; BONTÉ, 2010). Dessa forma, esses sistemas geram organizações emergentes, onde são analisados os impactos da tomada de decisão e das interações entre os agentes sobre o meio hidrológico em que estão inseridos.

Em problemas hidrológicos muitos pesquisadores utilizam SMA como técnica para simular, prever ou gerar respostas que auxiliem no processo de planejamento da gestão de recursos hídricos, tanto em questões de infraestrutura como em decisões políticas. BARTHEL et al. (2008) utilizou um SMA chamado DeepActor para representar os processos da tomada de decisão das partes interessadas sobre o uso de água. O DeepActor foi integrado a um sistema de simulação acoplado de 16 modelos individuais, dos quais simulam os impactos das mudanças no ciclo da água de uma bacia hidrográfica da Alemanha.

O trabalho de SCHREINEMACHERS; BERGER (2011) descreve o pacote de software baseado em agente Mathematical Programming-Based Multi Agent Systems (MP-MAS), para simular a tomada de decisão em sistemas agrícolas. O sistema é baseado em modelos dinâmicos de tomada de decisão de agricultores, acoplados a vários modelos dinâmicos de processos ambientais, tais como modelos de fluxos de água e mudanças na fertilidade do solo.

BERGLUND (2015) explora os sistemas de recursos hídricos como sistemas adaptativos complexos através do uso de SMA. O trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o uso de SMA em problemas de gestão de recursos hídricos, e dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso abordou uma análise sobre as interações de agentes reativos sobre à escassez de água e suas demandas. Já o outro estudo foi desenvolvido através de agentes ativos e teve como objetivo analisar os efeitos das interações entre um gerente regional e poluidores de água em um estuário, que modificam a auto-organização do sistema, e as metas de qualidade e redução de custos da água.

HERRERA; ALVES (2018) exploraram o uso de um SMA para analisar o comportamento de usuários de água frente a diferentes rendas e medidas de gestão na Região Administrativa de Brazlândia, no Distrito Federal (DF) do Brasil. O modelo foi desenvolvido como um sistema de gerenciamento de demanda de recursos hídricos de domicílios. Os agentes foram definidos como reativos, determinados como as unidades familiares e suas decisões foram geradas a partir do método PAGE (*Perceptions, Actions, Goals, Environmental*). E ainda, o comportamento dos agentes foi definido com base na parametrização dos dados obtidos através de um questionário aplicado aos residentes de Brazlândia.

Uma modelagem socio-hidrológica foi proposta por POULADI et al. (2019), para fornecer informações acerca de como fatores psicológicos de agricultores podem influenciar num processo de tomada de decisão em um sistema agrícola. No estudo, o comportamento dos agentes foi determinado com base em um SMA e na Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior*). E um modelo hidrológico dinâmico foi utilizado para representar os processos hidrológicos que influenciam o sistema socio-hidrológico.

2.3 Revisão sistemática da literatura

Para que uma revisão da literatura seja considerada rigorosa e válida, ela deve ocorrer mediante a processos de pesquisa sistemáticos (LILYEA et al., 2016). Através de uma revisão sistemática da literatura (RSL), pode-se identificar, selecionar e produzir evidências acerca de um assunto específico, auxiliando pesquisadores na busca por trabalhos relevantes sobre um tema (BIOLCHINI et al., 2005). O método da RSL garante que o processo de pesquisa seja realizado de forma objetiva, e que todos os trabalhos relevantes sejam considerados e analisados (BUDGEN; BRERETON, 2006). Por esse motivo, e por ser um método científico replicável, essa metodologia difere de revisões narrativas tradicionais (MENGIST; SOROMESSA; LEGESE, 2020).

Para auxiliar na investigação e análise de determinados temas, diversas áreas vêm sendo exploradas com o uso de RSL, como biologia (RODRIGUES et al., 2021; DOHOS et al., 2021), economia (MERLI; PREZIOSI; ACAMPORA, 2018; AGARWAL; STEINMETZ, 2019), educação (VERBRUGGEN; DEPAEPE; TORBEYNS, 2021; CHEN; XIAO, 2021), sustentabilidade (MALEK; DESAI, 2020; BOAR; BASTIDA; MARIMON, 2020), política (DACOMBE, 2018; REIS; SANTO; MELãO, 2021) e saúde (MCCARTY et al., 2021; KÖHNEN et al., 2021). Além disso, alguns trabalhos foram desenvolvidos utilizando RSL aplicada à gestão de recursos naturais, como é o caso do estudo de VÁZQUEZ OSORIO et al. (2018), sobre sistemas de monitoramento da qualidade da água com uso de SMA. Já o trabalho de FARIAS et al. (2019) explorou o uso das técnicas de SMA e RPG para solucionar diferentes tipos de problemas de gestão.

Os trabalhos individuais obtidos através de uma revisão sistemática são chamados de estudos primários, e uma revisão sistemática é considerada como uma forma de estudo secundário. Assim, para determinar os estudos primários envolvendo SMA, MCV e hidrologia, uma RSL foi

realizada. Nesse estudo, buscou-se resumir as principais conclusões sobre o tema e determinar as principais lacunas na pesquisa, visando compreender quais investigações são mais necessárias atualmente.

O principal propósito de uma RSL é desenvolver e obter respostas acerca de uma questão de pesquisa, a partir de um protocolo definido. Esse protocolo norteia a busca pelos principais trabalhos incluídos na literatura sobre o tema. Diante disso, a RSL foi utilizada para responder a seguinte questão de pesquisa: *quais foram os processos e desafios de artigos que envolveram SMA e MCV para resolver problemas hidrológicos*?

2.3.1 Metodologia da RSL

Pode-se definir uma RSL como um método que tem como objetivo identificar, avaliar e interpretar o estado da arte de uma questão de pesquisa específica ou área de um assunto ou fenômeno de interesse (KITCHENHAM et al., 2007). Os processos de uma RSL podem ser agrupados em três grandes grupos, denominados planejamento, execução e relatório (BIOLCHINI et al., 2005; KITCHENHAM et al., 2007). Na Tabela 3, são apresentadas cada uma dessas categorias, onde tem-se as etapas ordenadas para o desenvolvimento da RSL. Segundo BUDGEN; BRERETON (2006), partindo da questão de pesquisa, uma revisão sistemática da literatura visa responder essa questão com base em um protocolo definido. Sendo o protocolo um conjunto de regras que fornece métodos para a realização da revisão (MENGIST; SOROMESSA; LEGESE, 2020).

Tabela 3: Processos da RSL.

Planejamento	Especificar a questão de pesquisa Desenvolver o protocolo de revisão
Execução	Identificar os estudos primários Selecionar os estudos primários Avaliar os estudos primários
Relatório	Extração dos dados Síntese dos dados

Para que erros sejam evitados, deve-se revisar o protocolo em cada etapa da revisão e, se necessário, iniciar novamente cada processo. Dessa forma, o protocolo foi estruturado e dividido em partes, onde as Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam as informações utilizadas para gerar esse protocolo. Na Tabela 4 estão os principais tópicos para se iniciar o protocolo.

A questão de pesquisa (QP) foi definida com base na necessidade de buscar trabalhos que visam resolver problemas hidrológicos utilizando técnicas de SMA e MCV, conjuntamente. Existindo esses trabalhos, é interessante analisar como e porquê foram desenvolvidos. E com isso, entender os processos e desafios acerca do tema. Dessa forma, o objetivo da RSL foi determinar e analisar esses trabalhos, visando responder a QP. Para facilitar e conduzir as estratégias para responder essa questão, cinco questões específicas (QE) foram consideradas, como segue.

Tabela 4: Protocolo da RSL: Principais tópicos.

Tópico	**Informação**
Questão de pesquisa	Quais foram os processos e desafios de artigos que envolveram SMA e MCV para resolver problemas hidrológicos?
Principal objetivo	Através da RSL, determinar e analisar artigos, entre 2000-2020, que utilizaram SMA e MCV no contexto hidrológico.
Palavras-chave	- Multiagent System; - Rainfall-Runoff Model; - Hydrology or Hydrological.
Critério de inclusão	O artigo apresentou as palavras-chave ou suas variações.
Critério de exclusão	- O artigo não está nas bases de dados pesquisadas; - O artigo não está em inglês; - O artigo não foi publicado entre 2000 e 2020; - O artigo não se baseou em SMA ou MCV para resolver um problema de hidrologia.

QE_1. Como foram definidos os agentes do SMA, e qual(is) o(s) objetivo(s) desse modelo?

QE_2. Qual foi o MCV utilizado, e qual(is) o(s) objetivo(s) desse modelo?

QE_3. Foram necessárias outras técnicas para gerar o estudo? Se sim, quais e como foram utilizadas e relacionadas às ferramentas de SMA e MCV?

QE_4. Como o trabalho integrou o uso das técnicas de SMA e MCV?

QE_5. Os principais desafios encontrados possuem relação com os processos de modelagem do SMA e/ou do MCV?

A RSL foi desenvolvida para buscar trabalhos escritos na língua inglesa, por meio de três temas, que são: SMA (*multiagent system* - MAS); MCV (*rainfall-runoff model* - RRM); e hidrologia (*hydrology*). Pensando em ampliar a pesquisa, no último tema foi inserido o termo hidrológico (*hidrological*). Com isso, foram definidas as palavras-chave. A Figura 5 apresenta o diagrama de palavras-chave, onde a região **MAS `and` MCV `and` HH** representa a intersecção entre as três áreas, e foi o foco da pesquisa.

Para identificar os principais trabalhos acerca do tema, foram escolhidas as bases bibliográficas da literatura, as quais contém uma grande quantidade de artigos publicados em periódicos relevantes ao tema proposto. Essas bases estão apresentadas na Tabela 5. Em cada uma delas, foram consideradas as variações das palavras-chaves, que podem ser observadas na Tabela 6. Com essas variações, foram construídas as frases de busca, distintas para cada base de dados bibliográfica, onde as palavras `or` e `and` são definidas, respectivamente, como a união e a interseção das palavras-chave.

Para selecionar e analisar os estudos primários, foram realizadas quatro etapas, que podem ser observadas na Tabela 7. Na etapa de estratégia de seleção, para organizar e remover os artigos duplicados foi utilizado o software Mendeley[6]. Conforme os critérios de inclusão e exclusão,

[6]https://www.mendeley.com/

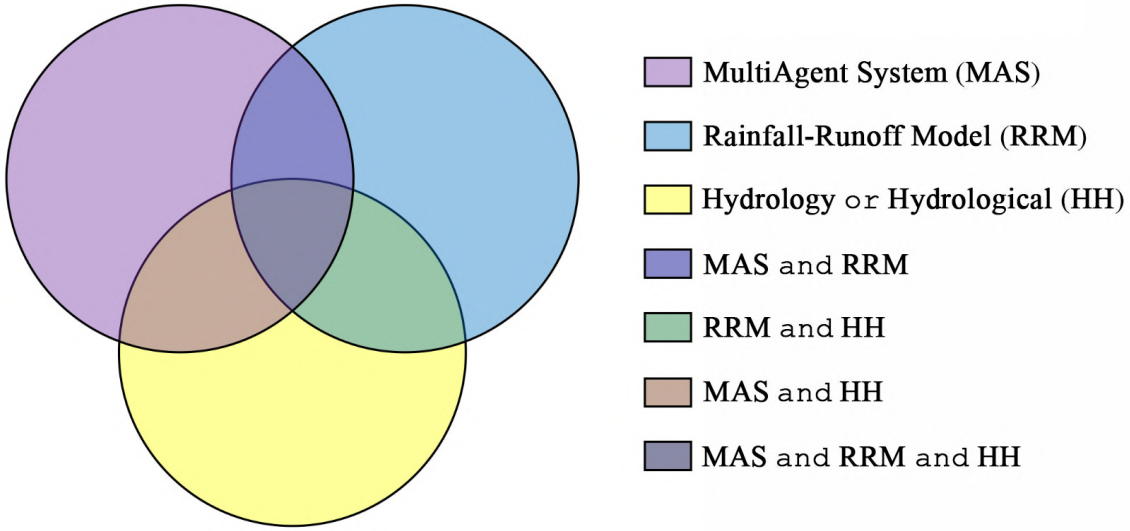


Figura 5: Diagrama de palavras-chave.

Tabela 5: Protocolo da RSL: Bases de dados bibliográficas selecionadas.

Nome da base de dados bibliográfica	**URL**
ACM Digital Library	https://dl.acm.org/
ASCE Library	https://ascelibrary.org/
IEEE Xplore	https://ieeexplore.ieee.org/
ScienceDirect	https://www.sciencedirect.com/
Scopus (Elsevier)	https://www.scopus.com/
SpringerLink	https://link.springer.com/

apresentados na Tabela 4, os estudos primários foram sendo selecionados ou descartados, a partir dos passos de leitura de títulos e resumo, leitura da introdução, e leitura completa.

A busca mais recente pelos estudos desta revisão sistemática ocorreu em fevereiro de 2021. Sendo assim, o total de artigos encontrados nas seis bases bibliográficas foi de 75, sendo 4 deles duplicados. Nas bases de dados ACM Digital Library, ASCE Library e IEEE Xplore não foram encontrados estudos contendo as frases de busca. Na base de dados ScienceDirect foram encontrados 9 trabalhos, na Scopus 60 trabalhos e na SpringerLink 6 trabalhos. Na Figura 6, pode-se observar a quantidade de trabalhos encontrados por ano em cada uma das bases de dados. Os anos de 2016 e 2020 apresentaram os maiores números de publicação sobre o tema da RSL abordado, sendo referentes a base de dados Scopus.

Na Tabela 8 pode-se verificar a quantidade total de estudos obtidos em cada etapa da estratégia de seleção. Na etapa de leitura do título e resumo, 49 trabalhos foram descartados segundo critérios de exclusão. Dos 22 estudos restantes, 12 foram eliminados na etapa de leitura e análise da introdução. Por fim, na leitura e análise completa dos 10 trabalhos restantes, 3 deles foram selecionados como os principais estudos referentes a RSL proposta.

Com a seleção dos estudos finais, pode-se cumprir as etapas de análise de qualidade, e extração e síntese de dados. Segundo KITCHENHAM et al. (2007), a avaliação de qualidade de cada trabalho pode ser determinada para atingir dois objetivos diferentes. O primeiro

Tabela 6: Protocolo da RSL: Organização das frases de busca.

("multiagent system"	or	"multiagent systems"	or
"multiagents system"	or	"multiagents systems"	or
"multi-agent system"	or	"multi-agent systems"	or
"multi-agents system"	or	"multi-agents systems"	or
"multiagent simulation"	or	"multiagents simulation"	or
"multiagent simulations"	or	"multiagents simulations"	or
"multi-agent simulation"	or	"multi-agent simulations"	or
"multi-agents simulation"	or	"multi-agents simulations"	or
"multiagent based simulation"	or	"multi-agent based simulation"	or
"multiagents based simulation"	or	"multi-agents based simulation"	or
"multiagent based simulations"	or	"multi-agent based simulations"	or
"multiagents based simulations"	or	"multi-agents based simulations"	or
"multiagent-based simulation"	or	"multi-agent-based simulation"	or
"multiagents-based simulation"	or	"multi-agents-based simulation"	or
"multiagent-based simulations"	or	"multi-agent-based simulations"	or
"multiagents-based simulations"	or	"multi-agents-based simulations")	
	and		
("rainfall runoff model"	or	"rainfall runoff models"	or
"rainfall runoff modeling"	or	"rainfall runoff modelings"	or
"rainfall runoff modelling"	or	"rainfall runoff modellings"	or
"rainfall-runoff model"	or	"rainfall-runoff models"	or
"rainfall-runoff modeling"	or	"rainfall-runoff modelings"	or
"rainfall-runoff modelling"	or	"rainfall-runoff modellings")	
	and		
hydrology	or	hydrological	

Tabela 7: Protocolo da RSL: Seleção e análise dos estudos primários.

Etapa	**Informação**
Estratégica de seleção	- Encontrar trabalhos; - Remover trabalhos duplicados; - Ler e analisar o título e o resumo dos trabalhos; - Ler e analisar a introdução dos trabalhos; - Ler os trabalhos completos.
Extração dos dados	Extração de resultados objetivos.
Avaliação de qualidade	Auxiliar na análise e síntese de dados.
Resumo dos dados	- Responder as perguntas específicas; - Responder a pergunta de pesquisa; - Responder as questões de avaliação da qualidade; - Comparar os trabalhos finais.

objetivo é referente a etapa de seleção dos estudos primários, onde os resultados da avaliação de qualidade devem servir para auxiliar na construção dos critérios de inclusão e exclusão. Já a segunda maneira de utilização desses resultados é usada para auxiliar na análise e síntese dos dados, onde se investiga se as diferenças de qualidade estão associadas as diferenças nos resultados dos estudos primários encontrados.

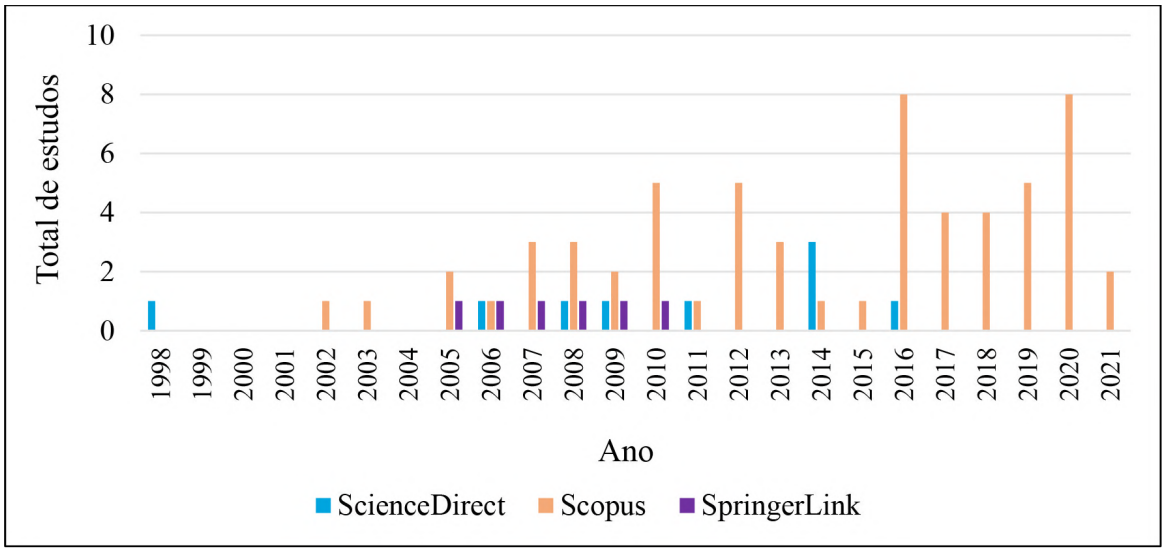


Figura 6: Quantidade de trabalhos por base bibliográfica.

Tabela 8: Resultados da estratégia de seleção.

Etapa da estratégia de seleção	**Quantidade total**
Trabalhos encontrados	75
Remoção de trabalhos duplicados	71
Análise do título e resumo dos trabalhos	22
Análise da introdução dos trabalhos	10
Análise dos trabalhos completos	3

Neste trabalho, optou-se pela escolha da segunda metodologia, pois possibilita a análise e descoberta dos principais desafios e lacunas de cada estudo primário. Para alcançar o objetivo da avaliação de qualidade, foram elaboradas cinco questões de qualidade (QQ).

QQ_1. Os resultados satisfazem os objetivos do estudo?

QQ_2. O estudo apresenta uma análise dos resultados obtidos?

QQ_3. A metodologia adotada é apresentada de forma clara e detalhada?

QQ_4. O estudo analisa as vantagens e desvantagens dos métodos utilizados?

QQ_5. O estudo apresenta uma análise sobre a integração das modelagens SMA e MCV?

A extração dos dados de cada trabalho pode ser realizada de forma direta ou indireta (BIOLCHINI et al., 2005). Considerando a forma direta, tem-se a extração de resultados objetivos, isto é, a coleta de dados é obtida diretamente dos trabalhos encontrados. Esse processo engloba quatro etapas: (i) identificação do trabalho (título da publicação, seus autores e a fonte); (ii) metodologia do trabalho; (iii) resultados do trabalho; (iv) desafios encontrados do trabalho. E, na forma indireta de extração dos dados, tem-se a extração de resultados subjetivos, ou seja, a extração de dados é realizada com informações extras do trabalho. Dessa forma, os resultados subjetivos podem ser coletados através de informações: (i) coletadas diretamente com aos autores de cada trabalho; (ii) geradas a partir de conclusões após a leitura do trabalho.

Para sintetizar os dados, é recomendado que seja realizado um resumo dos estudos primários finais, seguindo de uma comparação entre eles (KITCHENHAM et al., 2007). Para isso, foi realizada a leitura completa de cada trabalho, onde foram extraídos os dados, e respondidas: as questões específicas; as questões de qualidade; e a questão de pesquisa. Esses resultados e análises são apresentados na próxima seção.

2.3.2 Resultados da RSL

Os estudos primários obtidos, através do protocolo da RSL aqui proposto, são apresentados na Tabela 9. Visando apresentar a análise dos trabalhos de forma mais objetiva, as respostas para as questões específicas e de qualidade, e o resumo de cada um dos trabalho são apresentados no Apêndice B.1.

Tabela 9: Identificação dos trabalhos finais.

Autores	**Título**	**Fonte**
Mike Bithell and James Brasington	Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution	Scopus
Ang Yang, Dushmanta Dutta, Jai Vaze, Shaun Kim and Geoff Podger	An integrated modelling framework for building a daily river system model for the Murray–Darling Basin, Australia	Scopus
Sayantan Majumdar, Shashwat Shukla and Abhisek Maiti	Open agent based runoff and erosion simulation (oares): a generic cross platform tool for spatio-temporal watershed monitoring using climate forecast system reanalysis weather data	Scopus

Para responder a questão de pesquisa desta RSL, deve-se responder essa pergunta de forma ampla, a partir dos trabalhos finais obtidos. Assim, através do resumo de cada um dos estudos primários, pode-se responder essa questão separadamente, e posteriormente comparar os principais dados, métodos e desafios abordados. Dentre algumas das dificuldades em gerar uma modelagem sócio-hidrológica, BITHELL; BRASINGTON (2009) citam o processo de determinar as principais interações entre os sistemas, para que seja objetivo e bem definido. YANG et al. (2017), mencionam que um problema comum é a pouca quantidade e qualidade de dados hidrológicos disponíveis, que muitas vezes interferem diretamente na calibração e validação do modelo. MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018) comentam sobre a complexidade gerada ao integrar diferentes modelos, que muitas vezes apresentam resultados com uma baixa precisão.

Com relação aos objetivos, e integração de dados e ferramentas, os três trabalhos mostram diferentes metodologias e abordagens. BITHELL; BRASINGTON (2009) analisaram a mudança no uso do solo induzidas por ações antrópicas com base em três modelos acoplados; YANG et al. (2017) desenvolveram um SMA homogêneo para gestão de recursos hídricos através dos modelos eWater Source e SMDBRM; e MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018),

desenvolveram a plataforma OARES, para integrar um SMA, uma ferramenta de calibração e dados da região para modelar e simular o processo chuva-vazão e a erosão do solo. Nesse sentido, pode-se observar que diferentes problemas hidrológicos podem ser explorados utilizando a integração de SMA e MCV.

Os dados necessários para desenvolver e integrar os modelos dependeram dos objetivos e necessidade de cada trabalho. Dados da região de estudo se mostraram importantes dados de entrada e de validação dos modelos, como dados meteorológicos e hidrológicos. BITHELL; BRASINGTON (2009) utilizaram dados de um MCV calibrado e inseriram no SMA. YANG et al. (2017) utilizaram um processo de calibração automática através do modelo SMDBRM, onde o MCV foi utilizado para gerar o escoamento não medido em algumas regiões da área de estudo. No trabalho de MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018), os parâmetros necessários para o modelo foram gerados antes de serem inseridos no SMA. Assim, os processos de calibração foram realizados de forma independente, e com o intuito de gerar respostas hidrológicas para os respectivos SMA.

Os estudos abordaram as dificuldades em gerar uma modelagem acoplada que relacione as escalas espaciais e temporais entre os sub-modelos. Nos trabalhos de BITHELL; BRASINGTON (2009) e MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018), os SMA gerados foram baseados na integração do MDE como ambiente de modelagem multiagente, onde as mudanças hidrológicas eram conectadas às células ou sub-regiões. Esse processo gerou uma estabilidade espacial entre os modelos, mas para MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018) esse processo foi um grande desafio pela dificuldade em reamostrar os dados do MDE (Modelo Digital de Elevação) na plataforma multiagente NetLogo. Entretanto, a relação de escalas temporais entre os sub-modelos foi um grande desafio, o que enfatizou novamente a ideia de desenvolver uma modelagem que primeiro prepare os dados de entrada do modelo hidrológico, e depois simule o SMA.

A validação dos modelos se tornou o maior desafio entre os trabalhos apresentados. A dificuldade está em desenvolver um modelo acoplado com escalas espacial e temporal bem definidas, e que normalmente necessitam de uma grande quantidade de dados e um alto custo computacional para gerar as respostas necessárias nos sub-modelos. BITHELL; BRASINGTON (2009) afirmam que a possibilidade de gerar uma análise de sensibilidade desses modelos é quase impossível. Além disso, esses problemas geram o obstáculo em manter a dinâmica entre as ferramentas como SMA e MCV. Isto ocorre porque os dados são alterados de forma rápida, e os sub-modelos se revezam na necessidade e compartilhamento de dados.

Através desta revisão, pode-se perceber que nos últimos anos, vem crescendo a quantidade de trabalhos que exploram o uso conjunto das técnicas de SMA e MCV, mas esse crescimento é lento devido a complexidade em reunir os conceitos e dinamismos entre essas ferramentas. Dentre os estudos primários obtidos na RSL apresentados neste trabalho, pode-se constatar que poucos estudos abordam o uso conjunto de técnicas de SMA e MCV. Um dos motivos da escassez de estudos nessa linha de pesquisa é a alta complexidade apresentada. Além disso, alguns processos são necessários e desafios são enfrentados. Nesse sentido, pode-se responder a questão de pesquisa abordada nesta RSL.

Os principais processos que envolvem SMA e MCV para resolver problemas hidrológicos se resumem em: determinar as principais interações entre os modelos; determinar as escalas espacial e temporal dos sub-modelos e do modelo acoplado; calibrar os parâmetros necessários do modelo; validar o modelo; e simular o modelo. Já os maiores desafios são: alto custo computacional; interação entre as escalas espacial e temporal dos modelos; dinâmica entre os modelos; e validação do modelo.

Separadamente, SMA e MCV são ferramentas poderosas que possibilitam desenvolver modelagens de sistemas reais. SMA é uma técnica muito utilizada para compreender as interações sociais e as mudanças a partir da tomada de decisão de agentes. Os MCVs, por sua vez, servem para explorar a gestão ideal de recursos hídricos e as consequências das mudanças ambientais nos processos hidrológicos. Ao envolver essas técnicas para solucionar problemas hidrológicos, muitos trabalhos podem ser explorados com diferentes objetivos. Mas para que isso seja possível, as etapas dessa modelagem acoplada devem ser bem definidas e os desafios obtidos devem ser enfrentados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem o intuito de descrever a metodologia e os métodos que foram utilizados neste trabalho. Para isso, apresenta-se os dados da BHAF, e o desenvolvimento da modelagem sócio-hidrológica a partir da integração do SMA e do MCV.

3.1 Região de Estudo

A região de estudo deste trabalho se refere a Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata (BHAF), ilustrada na Figura 7. Esta bacia está localizada no sul do Rio Grande do Sul, e é parte do sistema hídrico da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG), da qual é uma bacia transfronteiriça entre Brasil e Uruguai. A BHAF ocupa uma área aproximada de $216km^2$ e possui um perímetro de $131km$.

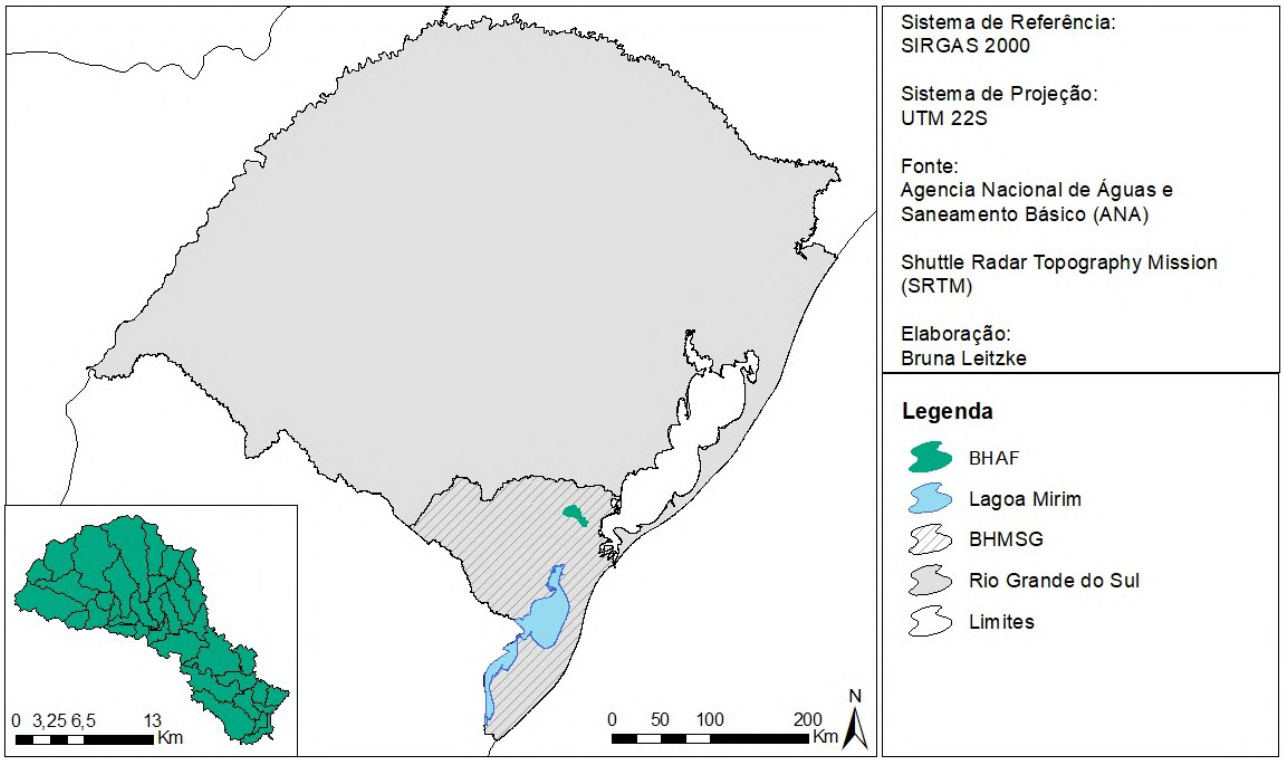


Figura 7: Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata.

Neste trabalho, buscou-se obter o comportamento do sistema sócio-hidrológico da BHAF, com vistas a estender a modelagem para outras regiões. A BHAF se relaciona diretamente com a BHMSG, pois possui exutório no Canal São-Gonçalo (CSG), do qual é um dos principais afluentes da BHMSG. O corpo d'agua principal da BHMSG é a Lagoa Mirim, considerada como um dos principais corpos hídricos do sistema lagunar meridional da América do Sul (KOTZIAN; MARQUES, 2004). Os cursos d'água da Lagoa Mirim tendem a convergir para o CSG, do qual faz a ligação entre a Lagoa Mirim e a Lagoa dos Patos (BELTRAME et al., 1998). Atualmente, o plano da BHMSG vem sendo construído através de reuniões e oficinas, pelo

comitê de gerenciamento da bacia, em conjunto com a comunidade e órgãos do governo. O uso de água da BHMSG tem grande contribuição econômica, tanto para empresários e agricultores, como pescadores artesanais e tradicionais (STEINKE; SAITO, 2008). Além disso, a BHMSG serve como fonte de água potável para o abastecimento populacional de cidades pertencentes à ela ou que estão em seu entorno (CALDEIRA et al., 2018).

Para simular as vazões de uma bacia hidrográfica utilizando o modelo LASH, deve-se obter dois bancos de dados, um com os dados temporais e outro com os dados espaciais. Os dados temporais necessários são dados hidrometeorológicos (velocidade do vento, umidade relativa, temperatura, radiação solar, vazão e chuva). Já os dados espaciais são os mapas da região de estudo (MDE, classes do solo, e uso do solo) e seus atributos. Nesse sentido, as próximas seções apresentam a obtenção e os dados utilizados para simular as vazões na BHAF.

3.1.1 Dados temporais

Os dados de vazão da região da BHAF foram obtidos através do Hidroweb[7], que representa um sistema, disponibilizado pela ANA, onde se encontra o banco de dados das informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), de estações pluviométricas e fluviométricas (ANA, 2020b). Além disso, foram fornecidos dados meteorológicos pelo Instituto Nacional de Meteorologia[8] (INMET) (INMET, 2020).

Os dados meteorológicos foram utilizados a partir da influência da estação sobre a região de estudo, sendo os únicos processos de tratamento a identificação de dados espúrios e o preenchimento de falhas. O tratamento e análise dos dados foi direcionado aos dados de chuva e vazão. Para isso, foram cumpridas seis etapas. Primeiro, foi verificado se a base de dados continha registro. Em um segundo momento, foi verificado o requisito para inclusão ou exclusão da estação de monitoramento, o qual era o de conter dados atuais e com no mínimo 5 anos de registro. Após foi realizada a constituição das séries históricas de chuva e vazão restantes, considerando dados diários no software SYHDA. Na quarta etapa foram verificadas as estações de influência sobre a região de estudo, através da análise dos polígonos de Thiessen determinados no ArcLASH, onde foi utilizado o limiar de $50000m$ para as estações pluviométricas e meteorológicas.

A quinta etapa foi a análise dos dados, utilizando o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK) (MANN, 1945; KENDALL, 1975). O uso dos testes não-paramétricos em séries temporais é indicado quando os dados são independentes e não possuem uma distribuição normal. Considerando que frequentemente as séries temporais hidrometeorológicas possuem esse tipo de dado, os métodos não-paramétricos são os mais adequados para verificar tendências (YUE; PILON; CAVADIAS, 2002). Por ser um método simples e robusto, o teste de MK pode ser usado com a ausência de valores ou com valores abaixo do limite de detecção (KOCSIS; KOVÁCS-SZÉKELY; ANDA, 2017). Para mais detalhes, o teste de MK é apresentado no anexo A.1. O teste de MK foi utilizado neste trabalho para analisar as tendências nas séries históricas

[7] https://www.snirh.gov.br/hidroweb/
[8] https://portal.inmet.gov.br/

de chuvas totais anuais e de vazões médias anuais. Com o teste foi possível verificar que as séries históricas são estacionárias. E na sexta etapa, foram identificados e preenchidos os dados faltantes. Na Figura 8, tem-se a localização das estações hidrometeorológicas empregadas, e a caracterização de cada estação é apresentada na Tabela 10.

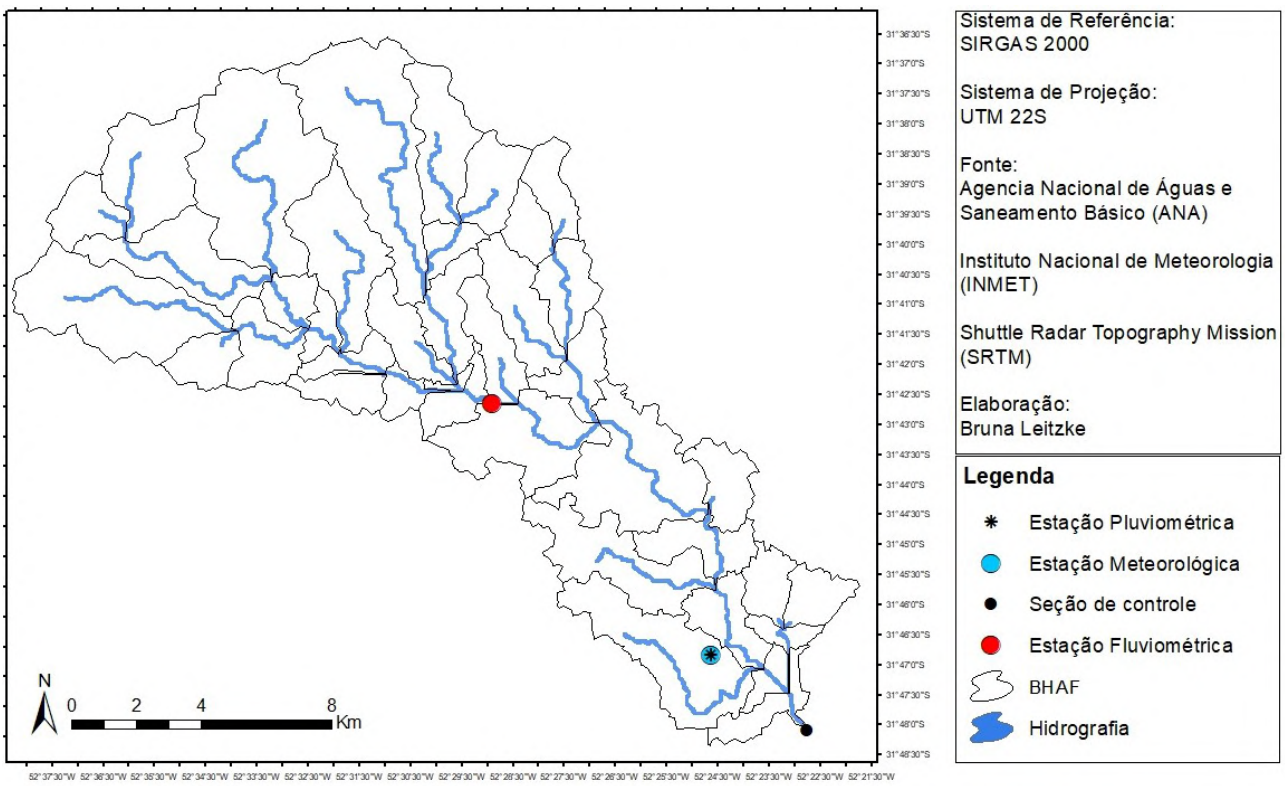


Figura 8: Pontos de monitoramento das estações hidrometeorológicas utilizadas neste estudo.

Nome	Tipo	Código	Cidade
Estação Agrometeorológica de Pelotas	Pluviométrica e Meteorológica	83985	Pelotas
Passo dos Carros	Fluviométrica	88750000	Pelotas

Tabela 10: Informações das estações hidrometeorológicas utilizadas neste estudo.

Através do software SYHDA, cada série histórica foi constituída considerando até 31 dias de falhas, com dados diários, para uso no modelo LASH. As séries históricas de vazão permaneceram sem alteração, sendo suas falhas preenchidas apenas com o acrônimo NA (*Not Available*), pois é através desse processo que o modelo LASH identifica as falhas. Na Figura 9, estão ilustrados o pluviograma e o hidrograma para o período de dados observados empregados neste estudo, do qual se refere a 01/01/2001 a 31/12/2020.

Através dos dados hidrometeorológicos disponibilizados, alguns valores específicos foram determinados para descrever, parcialmente, o clima da região. Esses valores podem ser verificados na Tabela 11. Pode-se observar que os picos de precipitação ocorreram entre os meses de setembro e janeiro. Entretanto, a maior quantidade de precipitação observada ocorreu em 07/05/2004, chegando a 216,8mm. Neste caso, a quantidade de vazão observada foi

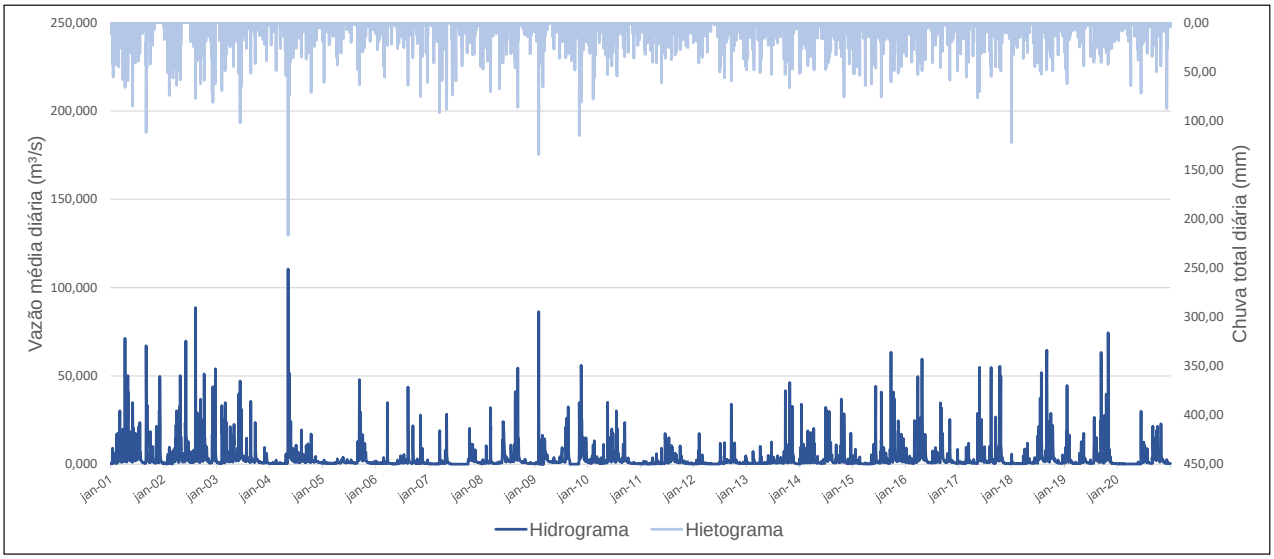


Figura 9: Pluviograma e hidrograma de dados diários observados.

$110,426 m^3 \cdot s^{-1}$. Em comparação, os casos mais recentes de máximas registradas para precipitação ocorreram em 02/01/2018 e 07/12/2020, com valores dados, respectivamente, por 122,10mm e 87,4mm. No geral, o clima da região pode ser caracterizado como temperado úmido e sem estação seca, com ocorrência de clima subtropical chuvoso (CALDEIRA, 2016).

Variável	Valor
Precipitação máxima absoluta	216,8 mm
Precipitação total anual média	1408,125 mm
Temperatura máxima absoluta	39,80^oC
Temperatura média das máximas	23,49^oC
Temperatura mínima absoluta	-3,00^oC
Temperatura média das mínimas	14,27^oC
Umidade relativa média	80,55%
Radiação solar média	16,40 $cal \cdot cm^{-2} \cdot dia^{-1}$
Velocidade do vento média	3,09 $m \cdot s^{-1}$
Vazão mínima absoluta	0,060 $m^3 \cdot s^{-1}$
Vazão máxima absoluta	110,426 $m^3 \cdot s^{-1}$

Tabela 11: Valores referentes as variáveis hidrometeorológicas no período de 01/01/2001 a 31/12/2020.

3.1.2 Dados espaciais

A discretização espacial da BHAF foi realizada através do ArcLASH (módulo auxiliar do LASH, comentado na Seção 3.2.1), onde o limiar da hidrografia da bacia foi estipulado como 2.778 $pixels$. Para isso, foi considerado um modelo digital de elevação (MDE), mapas de classes do solo e de uso e cobertura do solo, e as localizações das estações pluviométricas e fluviométricas, mencionadas anteriormente. O MDE é um arquivo formado por dados cartográficos que contém uma série de elevações, para várias posições no terreno, em intervalos

regularmente espaçados. Dessa forma, foi obtido um MDE com espaçamento de $30m$, disponibilizado pela plataforma *U.S. Geological Survey*[9] (USGS, 2020) que fornece dados de elevação obtidos através do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O SRTM contém um mapeamento da superfície terrestre em três dimensões completo e com alta resolução da Terra (FARR et al., 2007). Além disso, segundo MOURA et al. (2021), o SRTM de $30m$ apresentou valores satisfatórios para a caracterização de alguns atributos geomorfológicos importantes no processo de modelagem hidrológica, quando comparado a outras fontes de MDE.

O mapa de classes de solo da BHAF foi obtidos através do portal de Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais[10] (INDE) e disponibilizado em IBGE (2020). Este mapa pode ser visualizado na Figura 10, onde tem-se a representação de cinco regiões que compõem as classes de solo da BHAF. Cada classe de solo possui valores específicos para os parâmetros envolvidos. Os parâmetros das classes de solo empregados são apresentados na Tabela 12, onde θ_{PMP} é a umidade do solo no ponto de murcha permanente ($m^3 \cdot m^{-3}$), θ_S é umidade do solo no ponto de saturação ($m^3 \cdot m^{-3}$) e Z_{SOLO} é a profundidade do solo (mm).

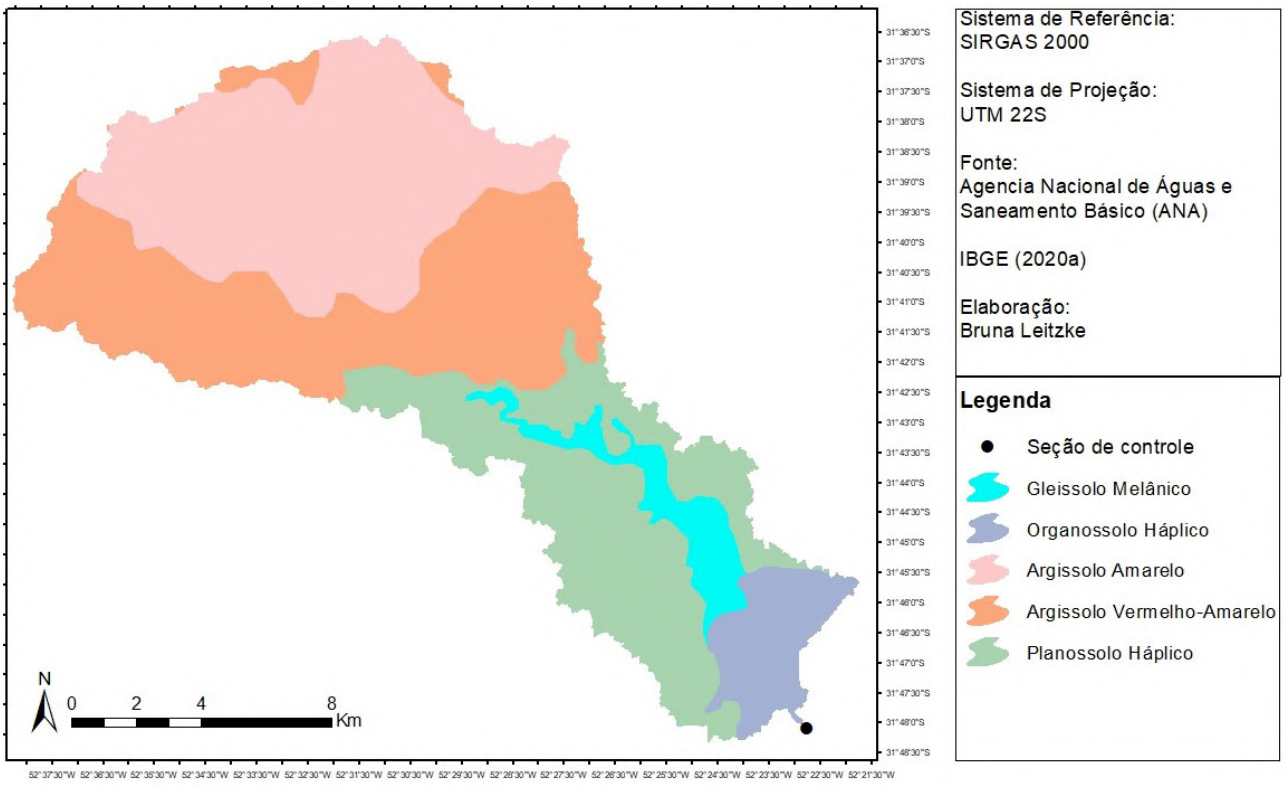


Figura 10: Distribuição espacial das classes de solo na BHAF.

O mapa de uso e cobertura do solo da BHAF foi obtido através do portal do Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul[11] (LABGEO, 2020). Neste caso, os arquivos obtidos contém dados cartográficos de diferentes grupos do uso do solo. Dessa forma, foi considerado 1 mapa do uso do solo por período sazonal (verão, outono, inverno e

[9]https://www.usgs.gov/
[10]https://www.inde.gov.br/
[11]https://www.ufrgs.br/labgeo/

Classe de solo	θ_{PMP}	θ_S	Z_{SOLO}
Argissolo Amarelo	$0,179^a$	$0,458^a$	$1080^{c,d,e}$
Argissolo Vermelho-Amarelo	$0,192^a$	$0,459^a$	1460^f
Gleissolo Melânico	$0,205^b$	$0,418^b$	1000^d
Organossolo Háplico	$0,369^b$	$0,643^b$	500^g
Planossolo Háplico	$0,175^a$	$0,405^a$	$1600^{h,i}$

Tabela 12: Parâmetros das classes de solo da BHAF.
Fonte: [a]AQUINO (2014), [b]OTTONI et al. (2018), [c]CUNHA et al. (1997), [d]CUNHA et al. (1997), [e]CUNHA; SILVEIRA; SEVERO (1996), [f]CUNHA; SILVEIRA (1996a), [g]CUNHA; SILVEIRA; SEVERO (2006), [h]CUNHA; SILVEIRA (1996b), [i]CUNHA; SILVEIRA (1996c).

primavera), totalizando 4 mapas para a BHAF. Para a região de estudo, as classes de uso do solo foram classificadas como água, agricultura, campo nativo, mata nativa, pastagem, silvicultura e solo exposto. Na Figura 11, é apresentado o mapa de uso do solo da região. Pode-se observar a predominância de área de agricultura para a região da bacia, como indicado na Tabela 13.

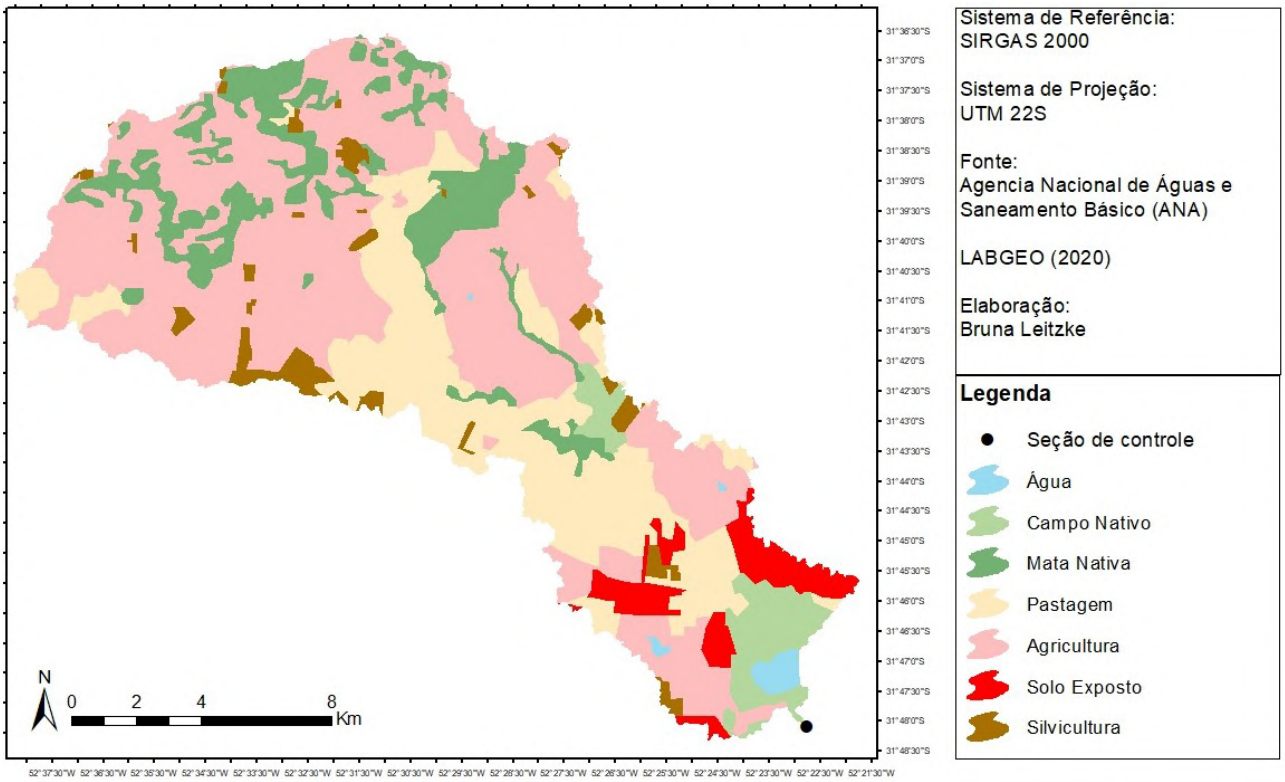


Figura 11: Distribuição espacial de uso e cobertura do solo na BHAF.

Os parâmetros do uso do solo estão apresentados na Tabela 14, onde r_s é a resistência estomática (ms^{-1}), h é a altura da vegetação (m), IAF é o índice de área foliar (m^2m^{-2}), e Z_{RAD} é a profundidade do sistema radicular (mm).

A resistência estomática $(m \cdot s^{-1})$ é responsável por regular a perda de água de uma planta para a atmosfera, através dos estômatos (CALDEIRA, 2016). Já o albedo é o poder de reflexão de uma planta, sendo a razão entre a radiação refletida e a radiação que cai sobre ela. A altura de uma vegetação é uma medida padrão dada em metros (m). Segundo VIOLA (2008), o índice de área foliar $(m^2 \cdot m^{-2})$ é um parâmetro fixo obtido da literatura, que representa a razão entre

Uso do solo	Percentual na BHAF
Água	0.8%
Agricultura	50.1%
Campo Nativo	4.8%
Mata Nativa	13.2%
Pastagem	22.9%
Silvicultura	3.7%
Solo Exposto	4.5%

Tabela 13: Percentual das classes de uso do solo na BHAF.

Uso do Solo	Período Sazonal	r_s	Albedo	h	IAF	Z_{RAD}
Mata Nativa	*Verão*	$140,00^a$	$0,13^f$	$10,00^e$	$5,67^c$	$2000,00^m$
	Outono		$0,15^f$		$4,00^c$	
	Inverno		$0,18^f$		$3,00^c$	
	Primavera		$0,16^f$		$3,67^c$	
Silvicultura	*Verão*	$112,00^a$	$0,13^f$	$5,00^e$	$4,01^i$	$1500,00^m$
	Outono		$0,15^f$			
	Inverno		$0,18^f$			
	Primavera		$0,16^f$			
Campo Nativo	*Verão*	$65,00^b$	$0,14^g$	$0,50^h$	$0,60^j$	$500,00^n$
	Outono		$0,13^g$			
	Inverno		$0,13^g$			
	Primavera		$0,14^g$			
Pastagem	*Verão*	$60,00^c$	$0,16^g$	$0,50^h$	$3,99^l$	$500,00^n$
	Outono	$70,00^c$	$0,15^g$		$3,21^l$	
	Inverno	$80,00^c$	$0,17^g$		$1,86^l$	
	Primavera	$80,00^c$	$0,17^g$		$2,67^l$	
Agricultura	*Verão*	$60,00^c$	$0,16^g$	$1,33^h$	$5,33^c$	$500,00^n$
	Outono	$70,00^c$	$0,15^g$	$0,37^h$	$3,00^c$	
	Inverno	$80,00^c$	$0,17^g$	$0,37^h$	$1,00^c$	
	Primavera	$80,00^c$	$0,17^g$	$0,21^h$	$2,00^c$	
Solo Exposto	*Verão*	$545,30^d$	$0,15^c$	$0,05^e$	$0,00$	$300,00^o$
	Outono		$0,15^c$			
	Inverno		$0,17^c$			
	Primavera		$0,16^c$			
Água	-	$0,00$	$0,10^c$	$0,05^e$	$0,00$	$0,00$

Tabela 14: Parâmetros do uso do solo.
Fonte: [a]ANDREW; DYMOND (2007), [b]BATHURST et al. (2011), [c]RUHOFF et al. (2013), [d]CORREIA; ALVALÁ; MANZI (2004), [e]COLLISCHONN (2001) , [f]MIRANDA et al. (1996), [g]GIONGO; PADOVANI; VETTORAZZI (2009), [h]BARROS (2016), [i]BERGER et al. (2019), [j]HESSEL et al. (2003), [l]FAGUNDES et al. (2006), [m]VIOLA (2008), [n]ALLEN et al. (1998), [o]MELLO et al. (2008).

a medida da área foliar ocupada por unidade de área do solo. E a profundidade do sistema radicular (mm) é um parâmetro fixo que estabelece uma camada de controle do balanço hídrico.

A discretização espacial no ArcLASH gerou uma subdivisão da BHAF em 39 sub-bacias, podendo ser visualizadas na Figura 12. As sub-bacias foram numeradas de 0 a 38, sendo esse número um identificador de cada uma delas.

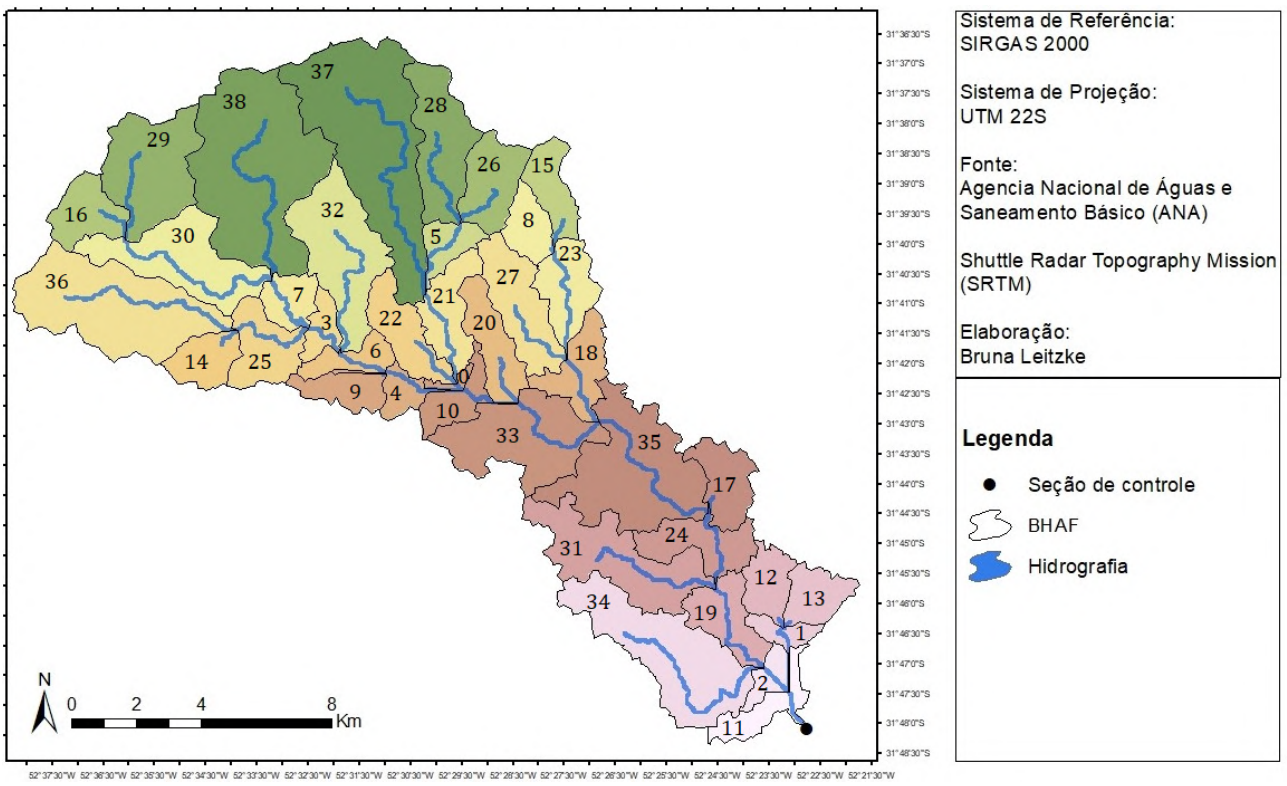


Figura 12: Discretização espacial da BHAF em 39 sub-bacias.

Um dos objetivos deste trabalho é analisar o impacto hidrológico diante de cenários de mudanças no uso e cobertura do solo na região de estudo. Mudanças no uso do solo geram implicações hidrológicas que podem ser estimadas pela simulação do modelo hidrológico. Dessa forma, alguns cenários foram definidos através das tendências que vem ocorrendo ao longo dos anos. Para identificar essas tendências, os mapas de uso e cobertura do solo dos anos 2002, 2009 e 2015 foram analisados. Esses mapas foram disponibilizados pelo portal do Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABGEO, 2020), e estão ilustrados na Figura 13. Pelos mapas, as mudanças mais aparentes ocorreram principalmente nas regiões central e noroeste da BHAF.

As análises de mudança no uso do solo de 2002 a 2015, e o cálculo das áreas de cada sub-bacia, foram realizados através da ferramenta ArcGIS. A área e a tendência de mudança no uso do solo, em cada sub-bacia da BHAF, estão indicadas na Tabela 15, onde as mudanças analisadas envolveram apenas agricultura (A), pastagem (P), silvicultura (S) e solo exposto (SE). As tendências foram determinadas como as mudanças no uso do solo verificadas ao longo dos anos. Pelas análises, em algumas sub-bacias não foram registradas mudanças significativas no uso do solo, e em outras foram registradas uma ou mais modificações.

Nas próximas seções, são apresentadas as metodologias utilizadas para desenvolver o modelo hidrológico e a construção do SMA. Na sequência, são descritos os cenários de mudança no uso e cobertura do solo, bem como as etapas de acoplamento do modelo LASH e do SMA com vistas a descrever os cenários propostos.

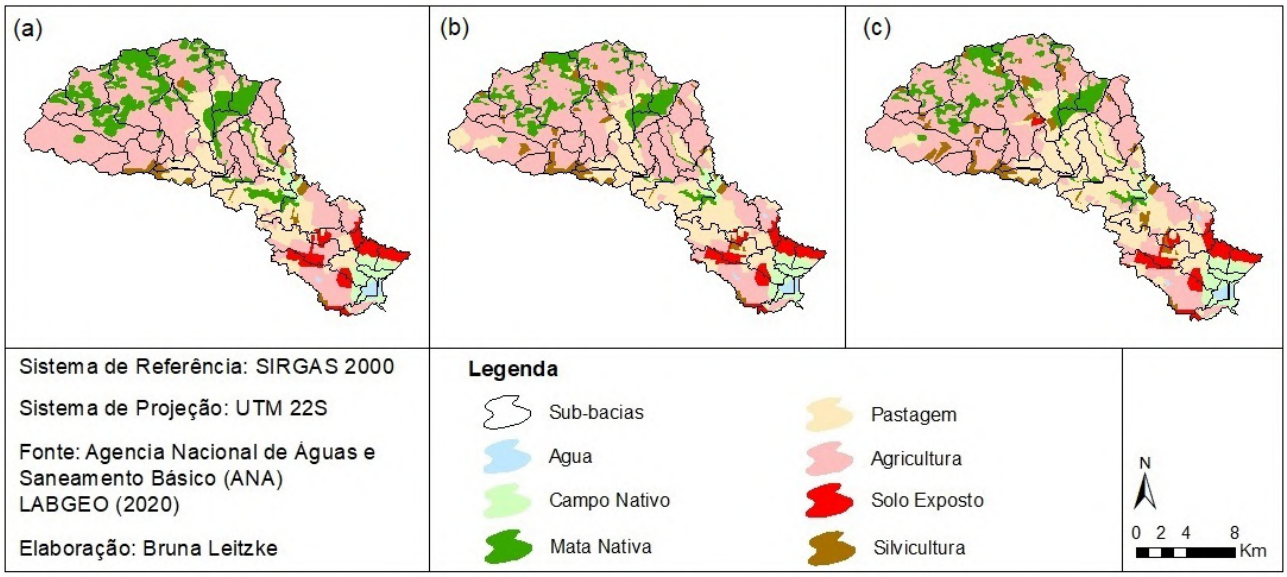


Figura 13: Distribuição espacial de uso e cobertura do solo na BHAF referente a situação em: (a) 2002; (b) 2009; e (c) 2015.

Sub-bacia	Área (km^2)	Tendência	Sub-bacia	Área (km^2)	Tendência
0	0.45	P	20	4.08	P
1	1.43	-	21	4.17	P
2	1.54	-	22	4.17	P
3	1.69	-	23	4.21	-
4	1.82	A	24	4.41	P
5	2.15	P	25	4.42	S
6	2.22	-	26	4.46	-
7	2.46	-	27	5.98	P
8	2.58	-	28	6.95	A e S
9	2.58	-	29	8.60	S
10	2.66	A	30	8.63	S
11	2.77	-	31	9.24	P, SE e S
12	2.86	-	32	9.28	P, SE e S
13	2.94	-	33	9.51	A e P
14	2.98	-	34	11.94	P e SE
15	3.16	P	35	12.95	A e P
16	3.59	P	36	13.89	P e S
17	3.72	P	37	18.63	P e S
18	3.93	P	38	19.24	S
19	4.07	S			

Tabela 15: Área e tendência de mudança no uso do solo por sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata.

3.2 Modelagem Hidrológica

O modelo LASH é considerado um modelo chuva-vazão semiconceitual, determinístico, contínuo, semidistribuído, e dinâmico, com passo de simulação diário. Este modelo possui alguns módulos com funções distintas, e que juntos auxiliam no desenvolvimento da modela-

gem (CALDEIRA, 2016). O primeiro módulo se refere a rotina hidrológica, onde o conceito central é a equação do balanço hídrico (BESKOW; MELLO; NORTON, 2011). Como o modelo é semidistribuído, em cada sub-bacia são estimadas as lâminas de escoamento, de forma superficial, subsuperficial e subterrânea, e então são obtidas as vazões. Esse processo é apresentado na Seção 3.2.1.

Um segundo módulo conta com uma ferramenta auxiliar chamada *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA) (VARGAS et al., 2019). Ela é considerada como um módulo integrado do LASH, de aquisição e análise de dados hidrológicos. Neste trabalho, SYHDA é utilizado para elaboração do banco de dados hidrológicos. No software, pode-se extrair séries históricas em diferentes intervalos de tempo (diário, semanal, quinzenal, mensal ou anual), de acordo com um ano civil ou hidrológico. Além disso, pode-se determinar períodos máximos de falhas nas séries históricas.

Para a simulação hidrológica através do modelo LASH, são necessários os dados espaciais referentes aos mapas de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDE-HC), declividade do terreno, direção e acúmulo de fluxo, rede de drenagem, sub-bacias hidrográficas, solos ou atributos do solo, uso do solo e do método polígono de Thiessen das estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico. Assim, o módulo auxiliar ArcLASH foi desenvolvido com o intuito de gerar, de forma automática, esse banco de dados espaciais (CALDEIRA, 2016). ArcLASH é uma extensão do software ArcGIS®, da qual é uma importante ferramenta de mapeamento e análise de dados. Os dados necessários para gerar a base espacial através do ArcLASH são o MDE, o mapa de solos, os atributos do solo, o mapa de uso do solo, os atributos de uso do solo, a localização da seção de controle, o mapa das estações de monitoramento pluviométrico e meteorológico e o liminar para definição da rede de drenagem.

O LASH conta com mais três módulos, referentes ao banco de dados de integração e de calibração automática. O primeiro, serve para armazenar informações das estações de monitoramento, das classes de solo, e das classes de uso do solo. O segundo, integra esses dados armazenados com a base de dados espaciais gerada no ArcLASH. E o terceiro é direcionado ao módulo de calibração automática multiobjetivo, através dos algoritmos de otimização *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992, 1994) e AMALGAM (VRUGT; ROBINSON, 2007). Assim, pode-se determinar os parâmetros que serão calibrados por sub-bacias ou para toda a bacia hidrográfica.

E ainda, algumas equações podem ser utilizadas e implementadas em cada algoritmo, como a raiz quadrada do erro quadrático médio ($RMSE$), coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), o coeficiente de Nash-Sutcliffe na sua versão logarítmica ($C_{NS-\log}$) e o percentual de viés (P_{BIAS}) (CALDEIRA, 2016; VARGAS, 2021). Cada uma das funções representa uma métrica matemática dos desvios entre as vazões observadas (Q_{obs_t}) e estimadas (Q_{est_t}) no tempo t, em que $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão média observada. Dessa forma, é possível analisar o desempenho do modelo. Considerando N como o número de ordenadas do hidrograma tem-se a representação dessas funções nas Equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4). Assim, cada função calcula e compara as combinações dos parâmetros até atingir o valor ótimo (VIOLA, 2008).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2} \tag{3.1}$$

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{N}(Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2}{\sum_{t=1}^{N}(Q_{obs_t} - \overline{Q_{obs}})^2} \tag{3.2}$$

$$C_{NS-\log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{N}(\log(Q_{obs_t}) - \log(Q_{est_t}))^2}{\sum_{t=1}^{N}(\log(Q_{obs_t}) - \log(\overline{Q_{obs}}))^2} \tag{3.3}$$

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{t=1}^{N}(Q_{obs_t} - Q_{est_t})}{\sum_{t=1}^{N}(Q_{obs_t})}.100 \tag{3.4}$$

O resultado do cálculo do $RMSE$ mostra se o modelo superestima ou subestima os valores observados de vazão através do erro da estimativa (CALDEIRA, 2016). Assim, quanto mais próximo de zero, mais preciso é o modelo (SINGH et al., 2005). E ainda, quando comparado ao desvio padrão dos dados observados, seu valor baixo é aquele considerado menor que a metade do desvio padrão (VARGAS, 2021). De acordo com VIOLA (2008), o valor obtido para C_{NS} é referente a eficiência do modelo em casos de cenários de cheias. E ainda, o valor de $C_{NS-\log}$ indica a capacidade do modelo em estimar vazões em cenários de estiagem. Dentre os valores de referência para análise do C_{NS}, quando $C_{NS} > 0.65$ o resultado é considerado muito bom, quando $0.54 < C_{NS} < 0.65$ o resultado é bom, e quando $0.50 < C_{NS} < 0.54$ isso indica que o ajuste é satisfatório (MORIASI et al., 2007). Já os valores de referência do P_{BIAS} avaliam erros no balanço hídrico do modelo, onde são analisados pelos valores $|P_{BIAS}| < 10\%$, sendo o resultado muito bom, $10\% \leq |P_{BIAS}| < 15\%$ bom, $15\% \leq |P_{BIAS}| < 25\%$ um valor satisfatório, e $|P_{BIAS}| \geq 25\%$ um resultado insatisfatório (KOUCHI et al., 2017).

A validação do modelo hidrológico ocorre a partir da aplicação de testes baseados por coeficientes estatísticos. Segundo KLEMEŠ (1986), quatro testes podem ser aplicados. O primeiro, é chamado *Split sample test*, do qual é utilizado na aplicação de processos estacionários, ou seja, quando as condições físicas não mudam sensivelmente com o tempo (VARGAS, 2021). Neste teste, o período de tempo é dividido e utilizado entre a calibração e a validação, em uma mesma bacia hidrográfica. O segundo teste corresponde ao *Proxy basin*, que também é utilizado na aplicação de processos estacionários, mas que ocorre mediante duas bacias distintas A e B. Quando elas são consideradas semelhantes, com relação às suas características edafo-climáticas, entre si e com uma outra bacia C, pode-se obter dados para a última bacia. Nesse caso, deve-se calibrar o modelo na bacia A, validar na bacia B, e vice-versa, onde os valores devem ser satisfatórios. O terceiro teste é chamado *Differential split-sample*, e é utilizado para

validar um modelo através de aplicações a processos não estacionários. Com ele, os processos de calibração e validação ocorrem na mesma bacia. E é voltado ao estudo de bacias com monitoramento, que sofrem modificações no regime fluviométrico, como mudanças climáticas ou de uso do solo (CALDEIRA, 2016). O quarto teste é o *Proxy-basin differential split-sample*, do qual é considerado uma combinação dos testes *Proxy-basin* e *Differential split-sample*. Ele é utilizado para validar modelos com aplicações em processos não estacionários. Entretanto, é calibrado e simulado em duas bacias distintas, para a obtenção de dados em uma terceira bacia sem monitoramento, da qual sofre mudanças hidrológicas.

3.2.1 Rotina hidrológica do LASH

Segundo VIOLA (2008), os modelos de simulação hidrológica chuva-vazão representam o comportamento do ciclo hidrológico em uma região, por meio de um sistema parametrizado. Assim, dependendo da precipitação (entrada), as condições de umidade do solo se modificam através do escoamento (fenômeno), e as vazões (respostas) se alteram. Para modelar esse processo, a equação do balanço hídrico do solo governa o sistema do modelo hidrológico LASH. Considerando ΔA como a variação diária de armazenamento de água no solo (mm), tem-se (VIOLA, 2008; BESKOW, 2009; CALDEIRA, 2016):

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{(P + D_{CAP} - ET_R - D_B - D_{SS} - D_{SUP})}{\Delta t}, \tag{3.5}$$

e

$$\Delta A = A_t - A_{t-1}, \tag{3.6}$$

onde P é o restante da precipitação média ao descontar a interceptação (mm), D_{CAP} é a ascensão capilar (mm), ET_R é a evapotranspiração real (mm), D_B é a lâmina de escoamento subterrâneo (mm), D_{SS} é a lâmina de escoamento subsuperficial (mm), D_{SUP} é a lâmina de escoamento superficial (mm), Δt é a variação do tempo correspondente a 1 dia, A_t é o armazenamento de água no solo ao final do intervalo de tempo (mm), e A_{t-1} é o armazenamento de água no solo no início do intervalo de tempo (mm). Ao iniciar a simulação, o valor de A_t é 50% do valor da capacidade de armazenamento de água no solo (A_M) para cada sub-bacia, visto que não existem dados monitorados para servir de entrada para a variável.

Também no início da simulação do modelo, a precipitação vai sendo armazenada na camada da vegetação, onde atinge o seu armazenamento máximo de interceptação (VARGAS, 2021). Para cada sub-bacia hidrográfica, a Capacidade do Reservatório de Interceptação (CRI) é dada por:

$$CRI = \alpha IAF, \tag{3.7}$$

onde α é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área foliar, com valor fixo de $0,2mm$, e IAF é o índice de área foliar. Sejam as lâminas armazenadas no reservatório (mm) nos tempos t e $t-1$, respectivamente como LI_t e LI_{t-1}, e a precipitação total (mm) no tempo t como P_t. Com esse limite atingido, o balanço hídrico é realizado. Existem três

situações para que isso ocorra no reservatório de interceptação:

$$((LI_{t-1} = 0) \wedge (P_t > CRI)) \vee (LI_{t-1} + P_t \geq CRI) \Rightarrow LI_t = CRI, \tag{3.8}$$

ou

$$((LI_{t-1} = 0) \wedge (P_t < CRI)) \Rightarrow LI_t = P_t, \tag{3.9}$$

ou

$$(LI_{t-1} + P_t < CRI) \Rightarrow LI_t = LI_{t-1} + P_t. \tag{3.10}$$

Assim, a precipitação (P) descontada a interceptação é dada por:

$$P = P_t - (LI_t - LI_{t-1}). \tag{3.11}$$

Ao encerrar o tempo t, o modelo estima o esvaziamento do reservatório de interceptação, diminuindo a lâmina armazenada no reservatório (LI_t) e a evapotranspiração potencial (ET_P).

A estimativa da lâmina de escoamento superficial direto (D_{SUP}) (mm) foi realizada através do método Curva-Número (CN) modificado (SCS, 1971; MISHRA et al., 2006):

$$D_{SUP} = \frac{(P_t - I_a)(P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S}, \tag{3.12}$$

$$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M}, \tag{3.13}$$

$$M = 0.5(-(1 + \lambda)S) + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_5 S}, \tag{3.14}$$

$$S = (\theta_S - \theta_A) Z_{RAD}, \tag{3.15}$$

$$S = A_M - A_t. \tag{3.16}$$

Em que I_a é a abstração inicial (mm), M é a umidade antecedente (mm), P_5 é a precipitação antecedente acumulada de 5 dias (mm), S é o armazenamento potencial de água no solo (mm), compreendido entre a quantidade de água no solo no ponto de saturação (θ_S) ($m^3 \cdot m^{-3}$) e a quantidade atual de água no solo (θ_A) ($m^3 \cdot m^{-3}$), Z_{RAD} é a profundidade de enraizamento (mm), e λ é o parâmetro calibrável de abstração inicial (adimensional), que varia de 0 a 0.5 (BESKOW, 2009).

As lâminas de escoamento subsuperficial (D_{SS}) (mm) e de escoamento subterrâneo (D_B) ($mm \cdot dia^{-1}$), foram estimadas segundo RAWLS et al. (1993). Assim, A_{CC} é a geração de escoamento subsuperficial (mm), dado por um valor fixo e estimado como sendo 10% de A_M. E sendo A_C a geração de escoamento subterrâneo (mm), um valor fixo e igual à 1% de A_M, tem-se:

$$\begin{cases} D_{SS} = 0, \quad \text{se} \quad A_t < A_{CC}, \\ D_{SS} = K_{SS} \left(\dfrac{A_t - A_{CC}}{A_M - A_{CC}} \right)^{\left(3+\frac{2}{Pr}\right)}, \quad \text{se} \quad A_t \geq A_{CC}, \end{cases} \tag{3.17}$$

$$\begin{cases} D_B = 0, \quad \text{se} \quad A_t < A_C, \\ D_B = K_B \left(\dfrac{A_t - A_C}{A_M - A_C} \right), \quad \text{se} \quad A_t \geq A_C, \end{cases} \tag{3.18}$$

onde K_{SS} e K_B são valores calibráveis, que representam, respectivamente, a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ($mm \cdot h^{-1}$) e a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo ($mm \cdot dia^{-1}$), e Pr é o índice de porosidade do solo, fixo e igual a $0,4$.

O componente de ascensão capilar (D_{CAP}) pode ser obtido para analisar áreas da bacia que apresentam baixa disponibilidade hídrica no solo, e alta quantidade de água do aquífero raso até o solo, o que interfere diretamente na quantidade total da evapotranspiração.

$$\begin{cases} D_{CAP} = 0, \quad \text{se} \quad A_t > A_{CAP}, \\ D_{CAP} = K_{CAP} \left(\dfrac{A_{CAP} - A_t}{A_{CAP}} \right), \quad \text{se} \quad A_t \leq A_{CAP}, \end{cases} \tag{3.19}$$

onde K_{CAP} é o parâmetro calibrável referente à densidade de fluxo máxima de retorno através da ascensão capilar, A_{CAP} é o limite de disponibilidade de água no solo (mm) para que ocorra a elevação capilar, estimado como 10% de A_M.

Para determinar a evapotranspiração de uma cultura (ET_C) (mm), as equações a seguir foram utilizadas segundo a metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Essas equações dependem de variáveis referentes aos dados meteorológicos disponíveis.

$$ET_C = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \left(\frac{86400\gamma\varepsilon}{T_{Kv} R r_a}\right)(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}, \tag{3.20}$$

$$\Delta = \frac{4098\left[0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2}, \tag{3.21}$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \tag{3.22}$$

$$R_{ns} = (1-a)R_s, \tag{3.23}$$

$$\begin{cases} R_{nl} = \sigma \left(\dfrac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35\dfrac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right), \quad \text{se} \quad R_s \leq R_{so}, \\ R_{nl} = \sigma \left(\dfrac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}), \quad \text{se} \quad R_s > R_{so}, \end{cases} \tag{3.24}$$

$$e_a = e_s \frac{UR}{100}, \tag{3.25}$$

$$e_s = \frac{\left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{min}}{T_{min}+237.3}\right)\right] + \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{max}}{T_{max}+237.3}\right)\right]}{2}, \tag{3.26}$$

$$R_{so} = [0.75(0.00002z)]R_a, \tag{3.27}$$

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)], \tag{3.28}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right), \tag{3.29}$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)], \tag{3.30}$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right), \tag{3.31}$$

$$\gamma = 0,000665 P_a, \tag{3.32}$$

$$P_a = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293}\right)^{5.26}, \tag{3.33}$$

$$T_{Kv} = 1.01(T + 273), \tag{3.34}$$

$$\begin{cases} r_a = \dfrac{6.25}{U_{10}} \left[\ln\left(\dfrac{100}{h}\right)\right]^2, & \text{se } \ h \leq 10m, \\ r_a = \dfrac{94}{U_{10}}, & \text{se } \ h > 10m, \end{cases} \tag{3.35}$$

$$U_{10} = v_{emp} \frac{\ln\left(\frac{100}{h}\right)}{\ln\left(\frac{20}{h}\right)}, \tag{3.36}$$

$$\begin{cases} v_{emp} = v, & \text{se } \ h_{est} = 2m, \\ v_{emp} = \dfrac{v \ln[(67.8 h_{est}) - 5.42]}{4.87}, & \text{se } \ h_{est} \neq 2m, \end{cases} \tag{3.37}$$

onde

- Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação do vapor de água ($kPa^{\circ}C^{-1}$);
- R_n é a radiação líquida ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- G é o fluxo de energia para o solo ($MJm^{-2}dia^{-1}$), onde $G = 0$;
- γ é a constante psicrométrica ($kPa^{\circ}C^{-1}$);
- ε é a razão do peso molecular do vapor d'água por ar seco (adimensional), onde $\varepsilon = 0.622$;
- T_{Kv} é a temperatura virtual (K);

- R é a constante de gás específico ($kJkg^{-1}K^{-1}$);
- r_a é a resistência aerodinâmica (sm^{-1});
- e_s é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa);
- e_a é a pressão atual do vapor d'água (kPa);
- r_s é a resistência estomática (sm^{-1});
- T é a temperatura do ar ($^{\circ}C$);
- R_{ns} é a radiação de ondas curtas ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- R_{nl} é a radiação de ondas longas ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- a é o albedo;
- R_s é a radiação solar ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4.903 \times 10^{-9} MJK^{-4}m^{-2}dia^{-1}$);
- $T_{max,K}$ é a temperatura máxima (K);
- $T_{min,K}$ é a temperatura mínima (K);
- R_{so} é a radiação de ondas curtas que ocorre quando não há nuvens no céu ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- UR é a umidade relativa ($\%$);
- T_{min} é a temperatura mínima ($^{\circ}C$);
- T_{max} é a temperatura máxima ($^{\circ}C$);
- z é a altitude ($m\ a.n.m$);
- R_a é a radiação que atinge o topo da atmosfera ($MJm^{-2}dia^{-1}$);
- G_{sc} é a constante solar ($MJm^{-2}min^{-1}$), onde $G_{sc} = 0,0820$;
- d_r é a distância relativa inversa Terra-Sol (adimensional);
- ω_s é o ângulo horário ao nascer ou pôr do sol (radianos);
- φ é a latitude (radianos);
- δ é a declinação solar (radianos);
- J é o número do dia no calendário Juliano;
- P_a é a pressão atmosférica (kPa);

- h é a altura da vegetação (m);
- U_{10} é a velocidade do vento a $10m$ da superfície (ms^{-1});
- v_{emp} é a velocidade do vento empregada (ms^{-1});
- v é a velocidade do vento média diária (ms^{-1}); e
- h_{est} é a altura (m) da estação meteorológica a partir da superfície do terreno.

A evapotranspiração real (ET_R) (mm) é diretamente proporcional à ET_C, e depende das condições de umidade e da quantidade nutrientes no solo, sendo expressa por (CALDEIRA, 2016):

$$ET_R = K_S ET_C, \tag{3.38}$$

onde K_S é o coeficiente de umidade do solo, definido como:

$$\begin{cases} K_S = \dfrac{\ln(A_t - A_{PMP})}{\ln(A_L - A_{PMP})}, & \text{se } \ A_t < A_L, \\ K_S = 1, & \text{se } \ A_t \geq A_L, \end{cases} \tag{3.39}$$

em que A_L é o limite inferior de água armazenada, a qual quando é atingida ocorre o decréscimo da evapotranspiração em mm, e A_{PMP} é a quantidade de água armazenada no ponto de murcha permanente (mm). No modelo LASH, A_L e A_{PMP} são, respectivamente, 10% e 50% de A_M.

A vazão é simulada a cada passo do modelo, para cada sub-bacia, onde é obtida através do somatório das vazões de saída dos reservatórios lineares $(m^3 s^{-1})$ superficial (Q_{SUP}), subsuperficial (Q_{SS}), e subterrâneo (Q_B), e que são obtidas pelas equações:

$$Q_{SUP} = \frac{D_{SUP} A_{sb}}{C_{SUP} T_c} = \frac{V_{SUP}}{C_{SUP} T_c}, \tag{3.40}$$

$$Q_{SS} = \frac{D_{SS} A_{sb}}{C_{SS} T_c} = \frac{V_{SS}}{C_{SS} T_c}, \tag{3.41}$$

$$Q_B = \frac{D_B A_{sb}}{C_B} = \frac{V_B}{C_B}, \tag{3.42}$$

$$T_c = 57 L^{1.155} H^{-0.385}, \tag{3.43}$$

onde A_{sb} é a área de drenagem de cada sub-bacia hidrográfica (m^2), V_{SUP}, V_{SS} e V_B são, respectivamente, os volumes nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo (m^3), C_{SUP}, C_{SS} e C_B são, respectivamente, os parâmetros de calibração da propagação dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, T_c é o tempo de concentração (min), L é o comprimento do curso d'água principal da sub-bacia (km) e H é o desnível do curso d'água principal (m), que está no ponto mais distante do exutório da sub-bacia.

A vazão obtida em cada sub-bacia é localizada no exutório da mesma. Após, ela atinge e percorre a rede de drenagem à jusante. Assim, somam-se as vazões em cada exutório do

percurso. Mais detalhes sobre a rotina hidrológica do modelo LASH podem ser obtidos através dos trabalhos de VIOLA (2008), BESKOW (2009), CALDEIRA (2016) e VARGAS (2021).

3.3 Simulação baseada em multiagente

3.3.1 Plataforma GAMA

O MABS proposto neste trabalho, foi desenvolvido com o intuito de simular as ações de agentes que negociam e modificam o uso do solo na BHAF, a partir de um SMA desenvolvido. Para isso a ferramenta GAMA foi utilizada. Na ferramenta, foram implementados os agentes e suas ações, o mapa da região de estudo, bem como os mapas de sub-bacias e uso do solo, os cenários de mudança no ambiente, e a discretização do ambiente em células quadradas.

A ferramenta GAMA possui linguagem própria GAML, baseada em JAVA, considerada uma linguagem de modelagem intuitiva com primitivas de alto nível para definir os agentes e seu ambiente (GAUDOU et al., 2014). Possui um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development environment* - IDE) para construir modelos, em que a IDE apresenta uma coloração de código, sintaxe e verificação de coerência (DROGOUL et al., 2013). A plataforma conta com uma biblioteca de modelos, e possibilita a criação de novos projetos. Resumidamente, a estrutura de modelagem no editor é determinada pelos campos *global*, *species* e *experiment*. No bloco *global*, são inseridos os dados, parâmetros e agentes. Em *species* são inseridos a localização, os atributos e ações dos agentes. E em *experiment* é programada a simulação do modelo, podendo ser gerada no próprio ambiente ou de forma gráfica. Ao longo das simulações, a evolução do sistema pode ser acompanhada. Além disso, alguns parâmetros podem ser ativados ou desativados, dependendo do objetivo do modelo.

Os agentes do modelo são explicitamente situados no ambiente de simulação, onde percebem as informações disponíveis, agem sobre o ambiente, e interagem com outros agentes ou com o próprio ambiente. O ambiente definido em GAMA é considerado como um agente, sendo possível inserir uma rotina de comportamento, a partir de cenários predefinidos (AMOUROUX et al., 2009). Isso possibilita que os dados vetoriais geográficos sejam integrados ao modelo, do qual é construído por camadas. Os agentes se movem, agem e interagem em uma camada, que é situada acima da camada do ambiente, e que é composta de objetos geográficos. Assim, é possível desenvolver os atributos e ações de um agente a partir de regiões específicas do ambiente (TAILLANDIER et al., 2012). O passo de simulação em GAMA é definido como ciclo (*cycle*). Neste trabalho, a simulação em GAMA tem escala temporal mensal, ou seja, cada ciclo representa 1 mês. Essa escolha foi determinada para estabelecer uma relação entre a escala temporal do modelo LASH e do SMA em GAMA. O modelo LASH possui passo de simulação diário, podendo gerar as vazões durante uma sequência de anos específicos. Assim, o MABS fornece as mudanças ocorridas em 1 ano, a partir de 12 ciclos simulados em GAMA. As mudanças no uso do solo geram novos parâmetros que são inseridos no modelo LASH, gerando vazões atualizadas.

Neste trabalho, o ambiente de simulação do SMA é definido como a região da BHAF, onde esta é discretizada em células quadradas. Os agentes são considerados gestores, que agem com o objetivo de modificar o uso do solo da bacia, em cada célula. Eles têm acesso aos dados de água disponível, através das vazões simuladas em LASH, bem como as mudanças no uso do solo possíveis em cada célula. Além disso, os agentes podem comprar ou vender lotes, dos quais representam as células do ambiente. Ao longo das simulações, são analisados o comportamento dos agentes e as ações sobre o manejo do uso do solo. Na Seção 3.3.2, o modelo desenvolvido em GAMA é apresentado de forma detalhada.

3.3.2 Sistema multiagente

A estrutura do SMA construído em GAMA foi desenvolvida considerando quatro *species*: `Gestor`; `BH_Arroio_Fragata`; `Uso_do_solo`; e `Sub_bacia`, e pode ser visualizada na Figura 14. Em GAMA, as *species* e o ambiente são considerados como agentes. Cada agente possui atributos, definidos de forma automática pelo GAMA, ou definidos pelo programador (TAILLANDIER et al., 2019). Além disso, cada agente pode ou não possuir ações. Neste trabalho, todos os agentes trocam informações entre si para atingir o objetivo de modificar o ambiente a cada ciclo. Entretanto, os únicos agentes que agem e modificam o ambiente são os gestores, definidos em `Gestor`, e a `BH_Arroio_Fragata`. No código, o bloco `global` contém as variáveis globais e os parâmetros do modelo, a criação das `species`, a implementação dos dados espaciais que determinam o ambiente e a definição do `grid`, da qual corresponde a discretização do ambiente em células quadradas. Nos blocos referentes as `species`, são implementadas as variáveis, os atributos e as ações, que possibilitam gerar as mudanças no sistema. E, por fim, tem-se o bloco `experiment`, onde se definem os aspectos do ambiente que são considerados na simulação, bem como os gráficos que serão visualizados.

```
model BHAF
global {
species Gestor skills: [ moving ]{
species BH_Arroio_Fragata {
species Uso_do_solo {
species Sub_bacia {
experiment Mudanca_no_Uso_do_Solo type: gui {
```

Figura 14: Estrutura do modelo desenvolvida em GAMA.

Na instância dos dados do MABS, é necessário definir os valores para alguns parâmetros que modificam a forma em que o SMA será simulado, de acordo com o objetivo de análise. Na Figura 15, tem-se a interface de simulação do SMA em GAMA. Ao lado esquerdo estão os parâmetros do modelo, que devem ser ajustados antes da simulação. No centro tem-se o

ambiente de simulação, contendo os agentes, as sub-bacias e os usos do solo da BHAF. No restante da interface, tem-se os gráficos que apresentam, a cada ciclo, resultados de algumas variáveis do modelo, a saber: mudança mensal de cada uso do solo; saldo e quantidade de lotes mensal por gestor; vazões mínima, média e máxima mensal.

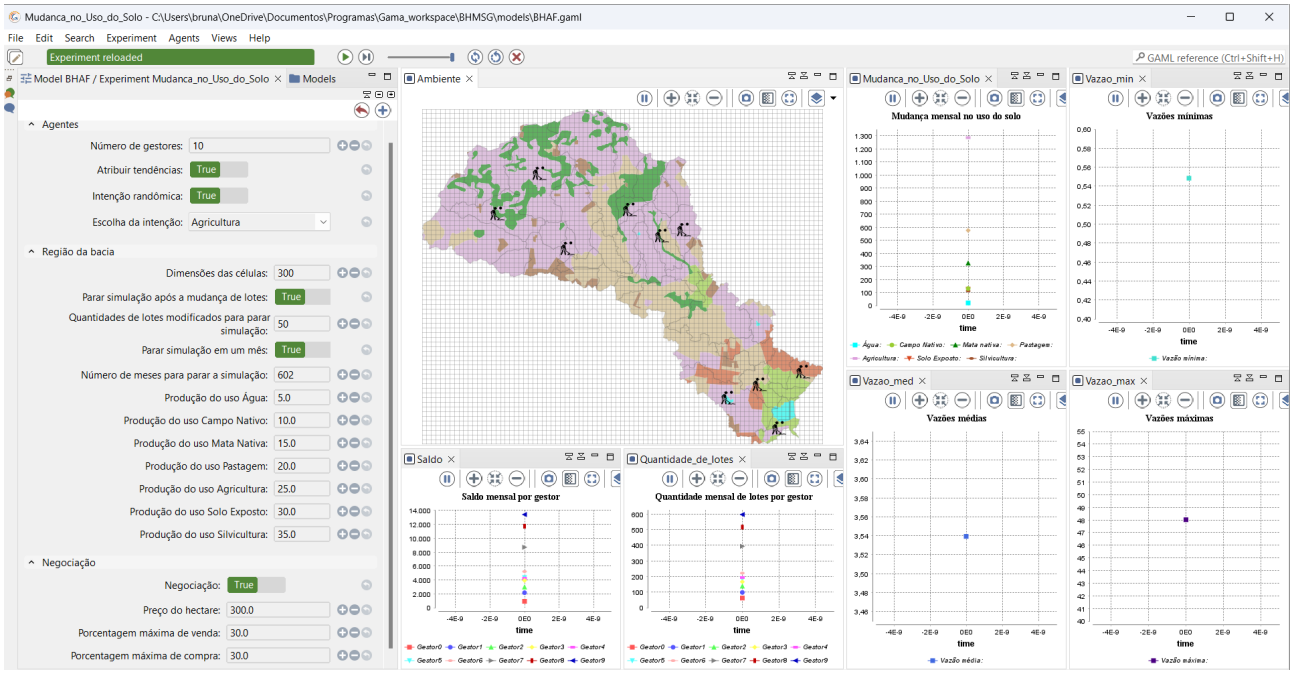


Figura 15: Interface de simulação do SMA desenvolvido em GAMA.

O `número de gestores` determina a quantidade de agentes que poderão agir e modificar o ambiente. Ao definir o número de agentes, as sub-bacias são divididas entre eles, onde uma lista específica (em forma de matriz) de sub-bacias distintas é atribuída a cada gestor. Nesse sentido, o número máximo de agentes não deve ultrapassar o número de sub-bacias. No exemplo da Figura 15, pode-se observar que foram considerados 10 gestores. Dessa forma, foram direcionadas de 3 a 4 sub-bacias por gestor. A localização inicial dos gestores é dada por uma posição aleatória das sub-bacias definidas para cada um deles. Na Tabela 16, tem-se a divisão de sub-bacias para uma simulação com 10 gestores, em que G representa um gestor, e o número de identificação dos agentes inicia por zero, de acordo com a ferramenta GAMA. Inicialmente, os gestores só podem modificar o uso do solo em células contidas nas sub-bacias que pertençam a eles. Entretanto, caso haja negociação entre os agentes, essa regra pode ser modificada, como será explicado ainda nesta seção.

Gestor	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
Sub-bacias	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37
	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
	3	7	11	15	19	23	27	31	35	

Tabela 16: Lista de sub-bacias por gestor em uma simulação com 10 agentes.

No SMA, cada gestor possui um objetivo de mudança no uso do solo, denominado `intenção`.

Para o usuário, existem três possibilidades para o mecanismo de escolha da intenção dos agentes, das quais podem ser observadas no fluxograma da Figura 16. Ao determinar como verdadeiro (*True*) o parâmetro `atribuir tendência`, o parâmetro `intenção randômica` é desprezado automaticamente. Neste caso, os agentes possuirão intenções conforme as sub-bacias e as tendências estabelecidas na Tabela 15. Dessa forma, em sub-bacias que não apresentam tendências, os agentes não poderão modificar a região. E nas sub-bacias com mais de uma tendência de mudança no uso do solo, como no caso das sub-bacias 28 e 31 a 37, o SMA atribuirá de forma aleatória um dos possíveis usos do solo para mudança na região.

Por outro lado, caso o parâmetro `atribuir tendência` seja falso (*False*), deve-se estabelecer se o parâmetro `intenção randômica` será verdadeiro ou falso. No caso em que ele é verdadeiro, a intenção de cada gestor é definida de forma aleatória pelo SMA, considerando 4 possibilidades de mudança no uso do solo: pastagem; agricultura; solo exposto; ou silvicultura. Entretanto, caso esse parâmetro seja falso, o usuário pode definir uma intenção para todos os agentes, isto é, os agentes terão um mesmo objetivo de mudança no uso do solo. Neste caso, o usuário define a intenção a partir da `escolha da intenção`, na interface de simulação, podendo escolher uma dentre as mesmas 4 possibilidades mencionadas anteriormente.

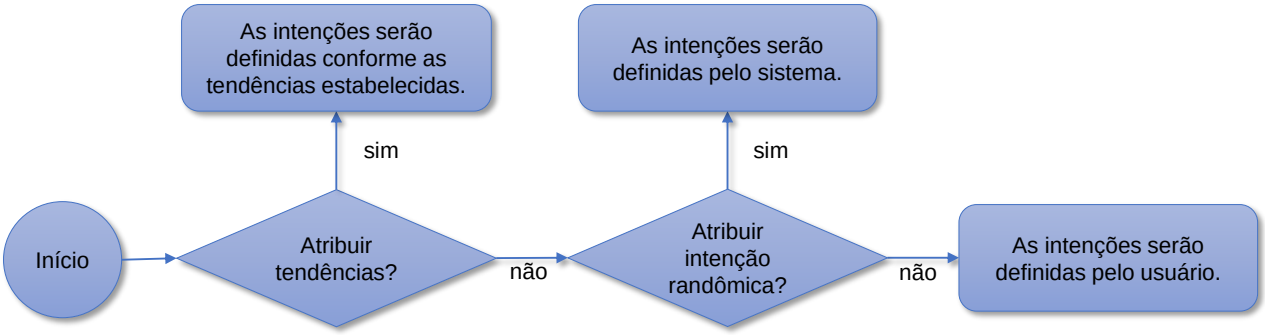


Figura 16: Fluxograma de determinação das intenções dos agentes no SMA.

Antes da simulação, o parâmetro `negociação` pode ser verdadeiro ou falso. Quando ele é falso, os gestores não interagem entre si, e modificam apenas suas sub-bacias. Neste caso, os agentes são considerados como reativos, isto é, suas interações são apenas com o ambiente (RUSSELL; NORVIG, 2002). Quando a `negociação` é determinada como verdadeira, os gestores podem negociar os lotes (células) pertencentes as suas sub-bacias, onde esse processo ocorre através da malha de células implementada sobre a região da BHAF. Cada gestor se movimenta sobre o ambiente, a cada ciclo. Para isso, estabeleceu-se uma velocidade de $100m$ por ciclo (mês). Dessa forma, tem-se um controle para que as mudanças gerais do ambiente não ocorram de forma brusca. Ao iniciar o movimento, o gestor é direcionado para a célula mais próxima, da qual apresenta uso do solo diferente da sua intenção. Assim, um gestor inicia a negociação quando se posiciona em uma célula contida em uma sub-bacia que não o pertence.

Cada célula presente na BHAF possui um uso do solo específico, e uma produção correspondente (parâmetros de produção podem ser visualizados na Figura 15). A produção é um valor fixo, definido na interface de simulação. Esse parâmetro corresponde a um valor de lucro

para cada uso do solo. Ao somar a produção total de cada célula nas respectivas sub-bacias de cada gestor, é definido um saldo inicial como atributo dos agentes. Esse saldo é atualizado a cada ciclo, e somado ao saldo anterior. Quando o parâmetro `negociação` é verdadeiro, o SMA relaciona o gestor com os lotes (células) que ele possui. Para isso, cria-se uma lista contendo as células pertencentes a cada gestor. Dessa forma, para atualizar o saldo, são contabilizadas as produções em cada lote, a cada ciclo. Neste trabalho, determinou-se a variação do saldo apenas nas simulações que consideram o parâmetro `negociação` como verdadeiro. Do contrário, o saldo não é definido.

Para cada gestor, a atualização do saldo depende do uso do solo em cada célula das suas sub-bacias. Quando há mudança no uso do solo, o saldo se modifica dependendo da nova produção total no ciclo. Além disso, são descontadas taxas que dependem da mudança realizada no ambiente e das negociações entre os agentes. No SMA, o saldo é um valor líquido, isto é, não desconta os possíveis gastos reais dos gestores, como atividades envolvendo manutenções, melhorias, novos equipamentos, despesas pessoais, dentre outros. Logo, é esperado que os valores para os saldos de cada gestor sejam crescentes. Entretanto, dependendo do tamanho da área de cada sub-bacia, e do uso do solo em cada célula, os saldos podem oscilar, ou crescer de forma mais rápida ou mais lenta. Além disso, quando há negociação entre os gestores, os saldos contemplam a compra ou a venda de lotes, a cada ciclo.

Para que a negociação ocorra de forma efetiva, estabeleceu-se dois valores, um de compra e outro de venda, dos quais são expresso pelas seguintes equações, respectivamente:

$$V_C = V_0 \left(1 + \frac{P_C}{100}\right), \tag{3.44}$$

$$V_V = V_0 \left(1 + \frac{P_V}{100}\right), \tag{3.45}$$

onde V_C é o valor de compra, V_V é o valor de venda, P_C é a porcentagem de compra, P_V é a porcentagem de venda, e V_0 é o valor de venda do lote, do qual depende do uso do solo estabelecido nele. As porcentagens de compra (P_C) e de venda (P_V) são valores definidos para todos os gestores. Na instância dos dados, o SMA determina as porcentagens, de forma randômica, entre 0 e o valor máximo definido antes da simulação, pelos parâmetros `porcentagem máxima de venda` e `porcentagem máxima de compra`. Esses valores indicam o quanto um gestor está disposto a pagar pelo lote, enquanto o gestor vendedor pode determinar um valor mínimo para venda. As porcentagens podem ser nulas, pois descreve situações em que os gestores não tem interesse em comprar ou vender um lote. Através dos parâmetros de `porcentagem máxima de venda` e `porcentagem máxima de compra`, os gestores podem negociar um lote específico. Essa negociação inicia apenas se a `porcentagem máxima de venda` for maior do que a `porcentagem máxima de compra`, isto é, quando o gestor interessado no lote fizer uma oferta de compra maior do que o valor de venda, do qual é definido pelo gestor responsável do lote.

O valor do lote é obtido através da multiplicação do preço do hectare pelo total de hectares contido em um lote, somado ao valor de produção do lote. Por exemplo, considerando uma

célula com dimensões iguais a $300m$ e uso do solo igual a pastagem, o lote tem o equivalente a $9ha$ e a produção igual a 20, como estabelecido pelo parâmetro `produção do uso pastagem` no exemplo da Figura 15. Neste trabalho, o preço do hectare é um valor fixo para toda a região, definido antes da simulação. Com base nessas informações, o valor do lote pode ser representado pela seguinte equação:

$$V_0 = V_H \cdot HA + Prod, \tag{3.46}$$

onde V_H é o valor do hectare, definido antes da simulação através do parâmetro `preço do hectare`, HA é a quantidade total de hectares do lote, e $Prod$ é o valor de produção de cada uso do solo. A partir da determinação das dimensões (Dim) das células no ambiente, HA é dado como $Dim^2/10000$.

Na Figura 17, tem-se um fluxograma, para o caso de negociação ativada, que ilustra as ações dos gestores, dependendo dos valores das variáveis envolvidas. A cada ciclo, o saldo é atualizado pois contabiliza todas as células do gestor, das quais podem ter sido vendidas, compradas ou modificadas.

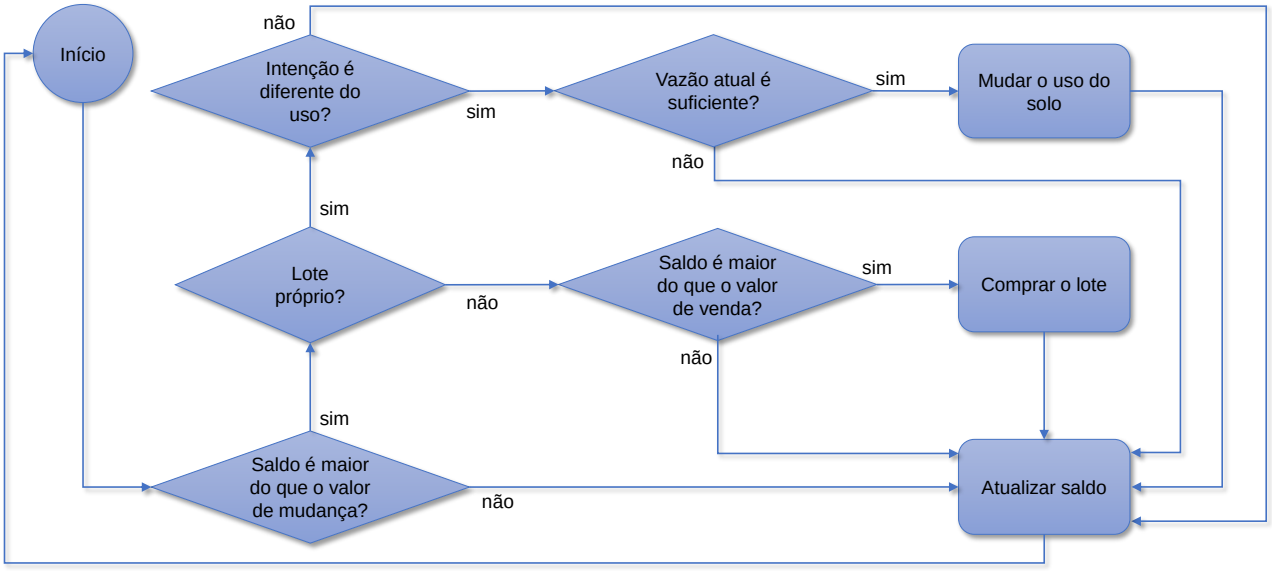


Figura 17: Fluxograma da negociação e da mudança no uso do solo realizada por um gestor, quando há negociação entre os agentes.

Cada gestor se movimenta sobre o ambiente seguindo a direção do lote que está mais próximo, e do qual é alvo de mudança no uso do solo. Em um primeiro momento, o gestor verifica se o saldo é maior do que o preço definido para a mudança do uso no solo no lote. Esse valor foi definido neste trabalho como:

$$V_M = \frac{V_H \cdot Prod}{HA}, \tag{3.47}$$

em que V_M é o valor para mudança do uso do solo. Se o saldo foi menor que V_M, o ciclo se encerra. Do contrário, o gestor identifica se o lote em que está posicionado o pertence.

Se o lote não faz parte do conjunto de lotes do gestor, ele tenta negociar a compra do lote. Para isso, é verificado se o saldo do gestor é maior do que o valor da venda, se sim, ele compra o lote. Caso contrário, o ciclo se encerra. Um gestor só pode modificar o uso do solo em um lote comprado, depois de finalizar o ciclo. Dessa forma, em um ciclo ele compra o lote e no outro ciclo ele modifica o uso do solo no lote.

Por outro lado, se o gestor possui o lote em que está posicionado, ele tenta modificar o uso do solo. Caso o uso do solo seja diferente da intenção, ele verifica se o valor da vazão no ambiente é maior do que a vazão necessária para modificar o uso do solo. Esse critério é apresentado em detalhes na Seção 3.4. Se a vazão necessária é menor do que a vazão do ambiente, o gestor consegue modificar o uso do solo, ou seja, os parâmetros do uso do solo no lote, e o aspecto definido pela coloração são atualizados. Do contrário o ciclo é encerrado.

Ao longo das simulações em GAMA, o console gera mensagens sobre o ambiente, bem como as tentativas dos gestores em mudar o uso do solo ou negociar a compra de um lote. As Figuras 18 e 19 ilustram, respectivamente, exemplos sobre esses dois casos em específico. Em particular, na Figura 18, a mensagem sobre o erro percentual entre as vazões corresponde a um valor de controle, do qual indica se a super ou subestimação das vazões foram extrapoladas no ambiente. Ocorrendo um desses casos, a mudança no ambiente não ocorre. Mais detalhes sobre esse processo são apresentados na Seção 3.4.

```
TENTATIVA DE MUDANÇA NO USO DO SOLO!
Lote: Celula[4672]
Erro percentual entre vazões mínimas: 0.2662
Mudança no uso do solo realizada com sucesso!
Uso do solo anterior: Agricultura
Mudança do uso do solo para: Pastagem
Gestor: [Gestor[7]]
```

```
TENTATIVA DE MUDANÇA NO USO DO SOLO!
Lote: Celula[3619]
Erro percentual entre vazões mínimas: 35.3689
Mudança no uso do solo não realizada!
```

Figura 18: Possíveis respostas a mudanças no uso do solo no MABS.

```
TENTATIVA DE COMPRA DO LOTE!
Gestor interessado: Gestor[0]
Gestor responsável pela sub-bacia: Gestor[4]
Sub-bacia: Sub_bacia[19]
Lote: Celula[5119]
Compra bem sucedida!
```

```
TENTATIVA DE COMPRA DO LOTE!
Gestor interessado: Gestor[3]
Gestor responsável pela sub-bacia: Gestor[6]
Sub-bacia: Sub_bacia[24]
Lote: Celula[4426]
Compra negada!
```

Figura 19: Possíveis respostas a negociações de compra e venda de um lote no MABS.

Com relação ao ambiente do SMA, considerou-se a região da BHAF. Os mapas da bacia, de sub-bacias, e de uso e cobertura do solo foram obtidos através do ArcLASH e foram implementados em GAMA (ver Figuras 11 e 12). Além disso, para definir a mudança no uso do solo da região, considerou-se uma malha quadriculada sobre o ambiente. Neste trabalho, cada célula é considerada como um quadrado de $300m$ de lado. Entretanto, através do parâmetro `dimensões das células`, pode-se definir uma outra medida para o lado da célula. Dessa forma, cada célula é considerada como um lote de $9ha$, que pode ter seu uso do solo modificado. Em cada célula

da malha são definidos o gestor responsável pelo lote, a sub-bacia, o uso do solo, a produção, e os parâmetros do uso do solo de acordo com a estação do ano (de acordo com a Tabela 14).

Ao iniciar o experimento em GAMA, o modelo contabiliza o número de células ocupadas, ou seja, aquelas que contém parte da região da BHAF. Para iniciar a simulação, são consideradas as vazões iniciais, que foram geradas através da simulação do modelo hidrológico LASH (ver Seção 4.1). E para analisar a mudança no ambiente, são contabilizadas inicialmente as células que contém cada uso do solo. Considerando células quadradas de $300m$ de lado, como é o caso do exemplo apresentado na Figura 15, os valores iniciais são apresentados na Figura 20. Pode-se observar que a quantidade de células ocupadas e as quantidades de células por uso do solo dependem da quantidade de células definida para as simulações.

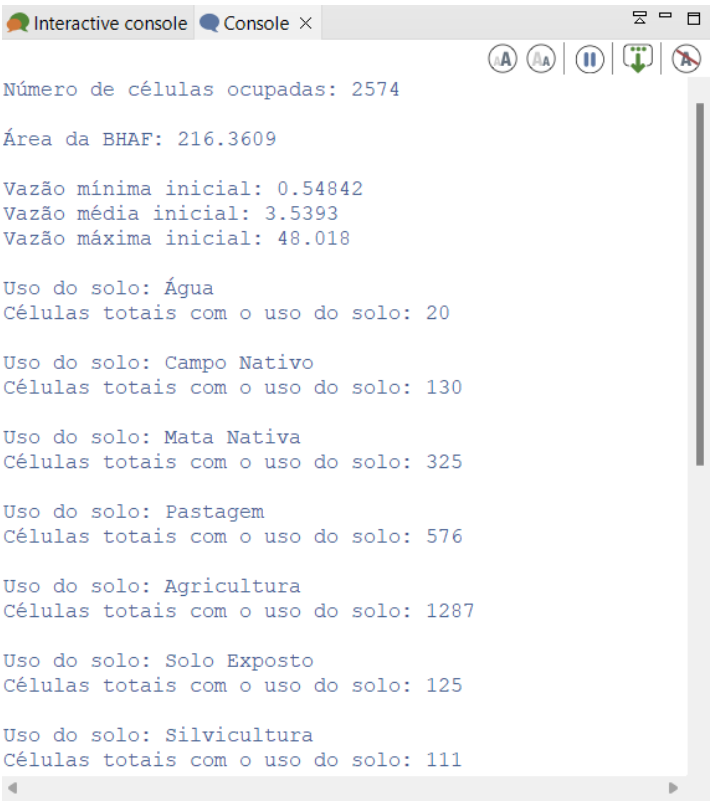


Figura 20: Valores iniciais das vazões, da quantidade de células ocupadas e das quantidades de células por uso do solo do MABS.

A partir disso, em cada sub-bacia são contabilizadas as produções por célula pertencente a ela. As produções são valores representativos do lucro obtido na implementação de determinado uso do solo. Os valores iniciais referentes a cada uso do solo são apresentados na Figura 15. Neste trabalho, são considerados dados fictícios de produção. Entretanto, o usuário pode estabelecer valores mais próximos da realidade, caso seja viável e determinante para o objetivo de pesquisa. Considerando o exemplo representado na interface, as produções inicias (saldos), de cada um dos 10 gestores, podem ser observadas na Figura 21.

Neste trabalho, o ambiente é considerado como inacessível, pois apesar dos gestores possuírem informações necessárias para concluir suas ações, eles não tem conhecimento sobre as possíveis consequências no ambiente. Entretanto, o ambiente é determinístico, pois os cenários são defi-

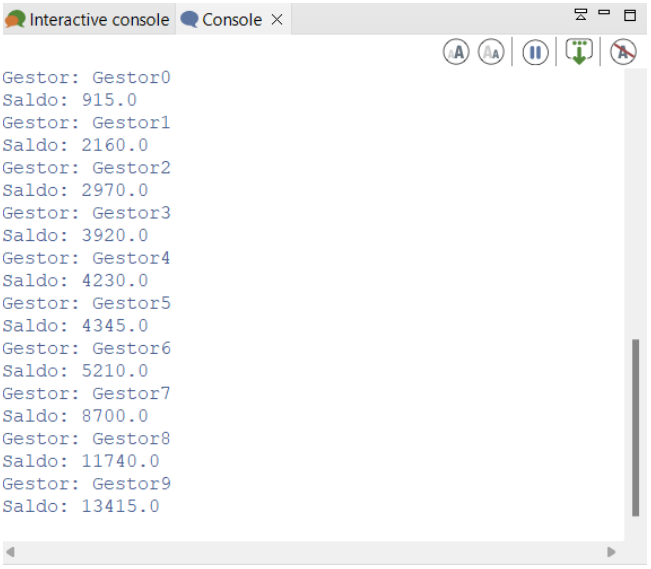


Figura 21: Representação dos valores iniciais para as produções de cada agente.

nidos e alternados com base nas ações dos agentes, onde cada ação tem uma única consequência (mudança de cenário). Quando não há negociação entre os gestores, o ambiente é considerado estático, pois só se altera a partir das ações dos agentes. Por outro lado, quando há negociação, o modelo é considerado semidinâmico, visto que os gestores podem negociar e interagir com outros gestores, enquanto o ambiente não se modifica (RUSSELL; NORVIG, 2002).

A simulação do SMA em GAMA pode ocorrer até que o usuário a interrompa. Entretanto, na interface do MABS, há duas opções de interrupção da simulação. Ao considerar verdadeiro o parâmetro `parar simulação após a mudança de lotes`, a simulação para no valor indicado para o `quantidades de lotes modificados para parar a simulação`. E ainda, se o parâmetro `parar simulação em um mês` for verdadeiro, a simulação para no valor indicado para o `número de meses para parar a simulação`.

Nesta seção, buscou-se descrever o MABS desenvolvido, do qual simula as ações de gestores com o objetivo de modificar o uso do solo em células específicas. Para isso, foram definidas regras sobre as condições do ambiente (vazões e valores de mudança) e as negociações entre os gestores (saldos e valores de compra e venda). Na próxima seção, são descritos os processos realizados para o acoplamento entre os modelos LASH e SMA. Além disso, são definidos os cenários de mudança no ambiente.

3.4 LASH e SMA: modelagem acoplada e cenários de mudança no uso do solo

A escala temporal do SMA é mensal, então o primeiro mês em GAMA é considerado no ciclo 0, e representa o mês de dezembro, onde tem-se o início do verão. Assim, passados 3 ciclos, a *specie* `BH_Arroio_Fragata` modifica a estação para o outono e, assim sucessivamente, atualizando todas as quatro estações do ano. Além disso, a cada ciclo são atualizados os

parâmetros do uso do solo, de acordo com a Tabela 14, considerando a estação do ano e o uso do solo nas células.

O modelo LASH estima as vazões diárias considerando atributos sazonais do uso e cobertura do solo, processados através do ArcLASH. Assim, os valores para r_s, Albedo, h, IAF e Z_{RAD} são tabelados (`*.txt`) de acordo com a estação do ano, e as sub-bacias. Para ilustrar, tem-se a Figura 22 com os dados referentes a resistência estomática, depois de serem processados. Pode-se observar que o arquivo é organizado de acordo com as colunas. As primeiras duas colunas se referem aos meses e anos de dados considerados para o processamento (destaque em azul), e as demais colunas correspondem as sub-bacias e seus respectivos valores para os atributos, no período determinado (destaque em roxo para a sub-bacia identificada como Sub0).

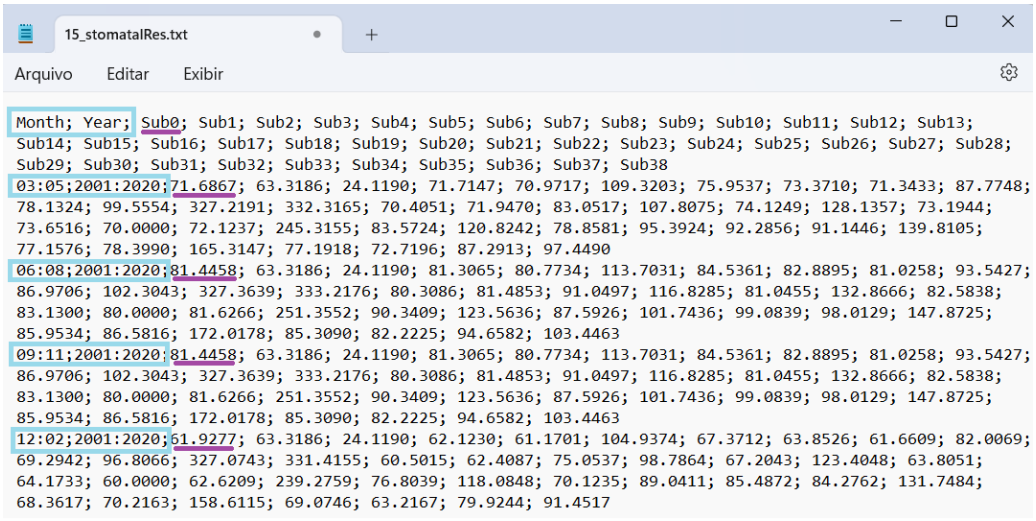


Figura 22: Atributo resistência estomática do uso e cobertura do solo, de acordo com os períodos sazonais e as sub-bacias definidas na BHAF.

Ao modificar o uso do solo em uma célula do ambiente do SMA, em GAMA, os atributos do uso do solo são atualizados para toda a região, com valores referentes a estação. Ao final de cada período sazonal, o SMA armazena a média dos parâmetros do uso do solo por sub-bacia, isto é, identifica o uso do solo, realiza a soma dos parâmetros de cada célula da sub-bacia e divide pela quantidade total de células da mesma. Após um ano simulado, o SMA gera um arquivo (`*.txt`) para cada atributo do uso do solo, com valores atualizados, por sub-bacia, semelhante ao arquivo da Figura 22. Ao gerar o novo arquivo, o modelo LASH é simulado, considerando as mudanças nos atributos do uso do solo. Dessa forma, o SMA é atualizado com os valores referentes as vazões mínima, média e máxima, do último ano simulado em LASH.

Para se ter um controle de mudança no uso do solo, o erro percentual (Eq. 3.48) foi utilizado para comparar a vazão mínima simulada (Q_{min}) e a vazão necessária (Q_{nc}), referente ao uso do solo que se queira implementar. Como mencionado na Seção 3.3.2, o SMA só gera mudança no uso do solo para pastagem, agricultura, solo exposto ou silvicultura. Nesse sentido, foi definido um valor de Q_{nc} para cada tipo de mudança no uso do solo. Para isso, modifica-se todo o ambiente do SMA com um único uso do solo, e gera-se as simulações no modelo LASH, a partir dos novos atributos do uso do solo. Os resultados dessas simulações são apresentados na Seção

4.2. As vazões mínimas obtidas, para cada caso, podem ser visualizadas na Tabela 17. Com isso, a mudança do uso do solo pode ocorrer no SMA apenas se E_P for menor que uma certa porcentagem definida antes da simulação.

$$E_P = \frac{|Q_{min} - Q_{nc}|}{Q_{min}} \tag{3.48}$$

Uso do solo	Vazão mínima (Q_{nc})
Pastagem	0.52666
Agricultura	0.52763
Solo exposto	0.53723
Silvicultura	0.525

Tabela 17: Vazões mínimas simuladas, do último ano de referência, ao modificar toda a região da BHAF por um único uso do solo.

Diante do que foi exposto, alguns cenários de mudança no uso do solo foram determinados para analisar o modelo acoplado. Esses cenários podem ser visualizados na Tabela 18. Em todos os cenários, a negociação foi considerada verdadeira, podendo descrever o comportamento social do modelo acoplado. Já o modelo hidrológico foi analisado conforme as vazões simuladas para cada resposta do SMA. Para a simulação das vazões, considerou-se o período de 19 anos, a partir dos dados disponíveis de 2001 a 2020.

Identificação	Cenário
1	100% da região convertida para pastagem, agricultura, solo exposto ou silvicultura.
2	Aumento de 10% e 20% das tendências de mudança no uso do solo na região, segundo Tabela 15.
3	Mudança de 20% do uso do solo, de forma aleatória.

Tabela 18: Cenários de mudança no uso do solo para o modelo acoplado.

O Cenário 1 (C1) foi considerado apenas para simular as vazões, após a modificação do ambiente, e implementá-las no SMA, resultando na Tabela 17. O objetivo de simular o Cenário 2 (C2) é obter o comportamento hidrológico da BHAF seguindo as tendências observadas ao longo dos anos. Dessa forma, considerou-se 10% e 20% da região modificada, isto é, cerca de 257 e 515 células do ambiente, respectivamente. Para isso, serão considerados 15 gestores, com o intuito de avançar as mudanças no ambiente. Como não foram identificadas mudanças significativas no uso do solo em algumas sub-bacias da BHAF, neste cenário não foram considerados altos índices de modificação. Com este cenário pode-se prever futuros impactos na região. Além disso, pode-se analisar o tempo médio para que haja a mudança total no ambiente.

Já o Cenário 3 (C3) foi considerado com o intuito de analisar o comportamento hidrológico após situações aleatórias de mudança no uso do solo. Neste caso, foram considerados 20% de mudança na região, ou ainda, 515 células do ambiente. Como são atribuídas intenções aos agentes, dentre quatro possibilidades, o modelo deve gerar mudanças mais impactantes, que

tendem a um uso do solo predominante. Neste cenário, são considerados 15 gestores, para comparar as mudanças ocorridas e o tempo total com o Cenário 2. Além disso, em algumas situações pode-se verificar o impacto hidrológico do reflorestamento ou do desmatamento na região.

Este capítulo apresentou o desenvolvimento para a construção do modelo acoplado sócio-hidrológico. Os métodos e materiais foram definidos e apresentados. Além disso, foi descrito o método de acoplamento do SMA e do MCV. No próximo capítulo estão os resultados obtidos para cada cenário apresentado. São apresentadas análises dos modelos social e hidrológico, bem como conclusões a respeito do acoplamento desses dois modelos.

4 RESULTADOS

4.1 Calibração e Validação do modelo LASH

Neste trabalho, o modelo LASH foi utilizado para calibrar, validar e simular as vazões na BHAF. O período de modelagem para a região de estudo foi delimitado conforme a disponibilidade, quantidade e qualidade dos dados obtidos, de vazão, chuva e meteorológicos, e pode ser visualizado na Tabela 19. Com relação a validação do modelo, foi utilizado o método *Split Sample Test*. Assim, a base de dados foi separada e utilizada como determinado, em cada etapa do período de trabalho.

Período de trabalho	Aquecimento	Calibração	Validação
2001 - 2019	2001	2002 - 2010	2011 - 2019

Tabela 19: Período de modelagem para a BHAF.

Os dados do ano de 2001 foram utilizados para a etapa de aquecimento do modelo LASH, como indicado na literatura, para evitar incertezas oriundas de condições hidrológicas iniciais desconhecidas (CALDEIRA et al., 2019; VARGAS, 2021). Os dados de 2002 a 2011 foram utilizados para calibrar sete parâmetros do modelo LASH. Esses parâmetros podem ser visualizados na Tabela 20, e representam, respectivamente, o coeficiente de abstração inicial (λ), a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (K_{SS}), a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (K_B), a densidade de fluxo máxima de retorno por ascensão capilar (K_{CAP}), a propagação do reservatório superficial (C_{SUP}), a propagação do reservatório subsuperficial (C_{SS}) e a propagação do reservatório subterrâneo (C_B).

Parâmetro	λ	K_{SS}	K_B	K_{CAP}	C_{SUP}	C_{SS}	C_B
Valor	0.01	1.07	2.35	3.71	35.24	297.93	10.07

Tabela 20: Valores dos parâmetros calibrados para a BHAF.

Neste trabalho, o modelo foi calibrado e validado considerando as sub-bacias da BHAF a montante da seção de controle Passo dos Carros (BHAF-PC), da qual foram obtidos os dados de vazão (ver Figura 8). Essa região apresenta área de drenagem de aproximadamente $132km^2$, e possui 21 das 39 sub-bacias resultantes da discretização espacial da BHAF. Na Tabela 21 tem-se os valores dos parâmetros calibrados para a mesma região da BHAF-PC em diferentes trabalhos. O período de calibração nos trabalhos de CALDEIRA (2016), CALDEIRA et al. (2019) e CALDEIRA (2019) foi considerado a partir dos dados observados entre os anos de 1995 a 2000.

O parâmetro λ pode variar consideravelmente, dependendo das condições da região de estudo (MISHRA et al., 2006). Esse parâmetro indica a rapidez em que o início do escoamento superficial direto ocorre, a partir de eventos de precipitação similares (CALDEIRA, 2019). Segundo VARGAS (2021), o λ tende a variar por sub-bacia, por consequência dos condicionantes

Autores	λ	K_{SS}	K_B	K_{CAP}	C_{SUP}	C_{SS}	C_B
CALDEIRA (2016)	0.115	5.261	0.634	2.021	46.558	165.444	57.543
CALDEIRA et al. (2019)	0.039	10.777	0.476	0.971	43.406	355.047	43.075
CALDEIRA (2019)	0.13	4.39	0.79	2.02	40.39	295.08	32.40

Tabela 21: Valores dos parâmetros calibrados para a região da BHAF-PC, obtidos na literatura.

de atributos físicos das classes solo e da umidade antecedente, do uso do solo e do regime pluviométrico.

Os parâmetros K_{SS} e K_B fornecem, respectivamente, a condutividade hidráulica dos reservatórios subsuperficial e subterrâneo, e estão relacionados ao tipo de solo. Segundo CALDEIRA (2016), as diferenças entre esses parâmetros, se comparados a outros estudos, podem estar relacionadas aos valores da condutividade hidráulica do solo saturado. Já o parâmetro K_{CAP} indica a máxima densidade de fluxo por ascensão capilar que a bacia apresentará em condições de umidade do solo propicias à sua ocorrência (CALDEIRA, 2019).

Os parâmetros C_{SUP}, C_{SS} e C_B indicam o quão rápido será o crescimento e o decrescimento das vazões nos reservatórios. C_{SUP} e C_{SS} refletem o tempo de resposta dos reservatórios superficial e subsuperficial, respectivamente. De acordo com VARGAS (2021), para que haja sentido hidrológico na calibração dos parâmetros, é necessário que seja satisfeita a seguinte relação $C_{SUP} < C_{SS}$. Já o parâmetro C_B indica o tempo de retardo do escoamento de base. A importância desse parâmetro está na possibilidade de compreender o escoamento de base, do qual alimenta os cursos d'água em períodos de estiagem (CALDEIRA, 2019).

A partir dos parâmetros calibrados, apresentados na Tabela 20, as vazões foram estimadas para a região da BHAF-PC, para os períodos de calibração e validação. Nas Figuras 23 e 24 estão os hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e de validação, respectivamente. Para analisar os resultados do modelo, foram geradas as estatísticas de desempenho, das quais indicam resultados satisfatórios para as estimativas das vazões.

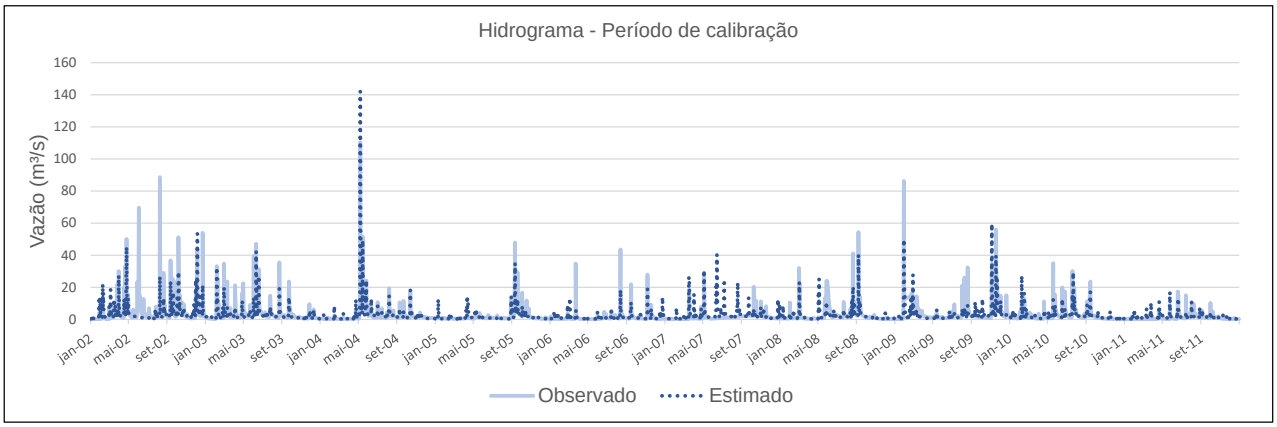


Figura 23: Hidrograma diário observado e estimado pelo modelo LASH para o período de calibração na seção de controle da BHAF à montante da seção de controle "Ponte Passo dos Carros" (BHAF-PC).

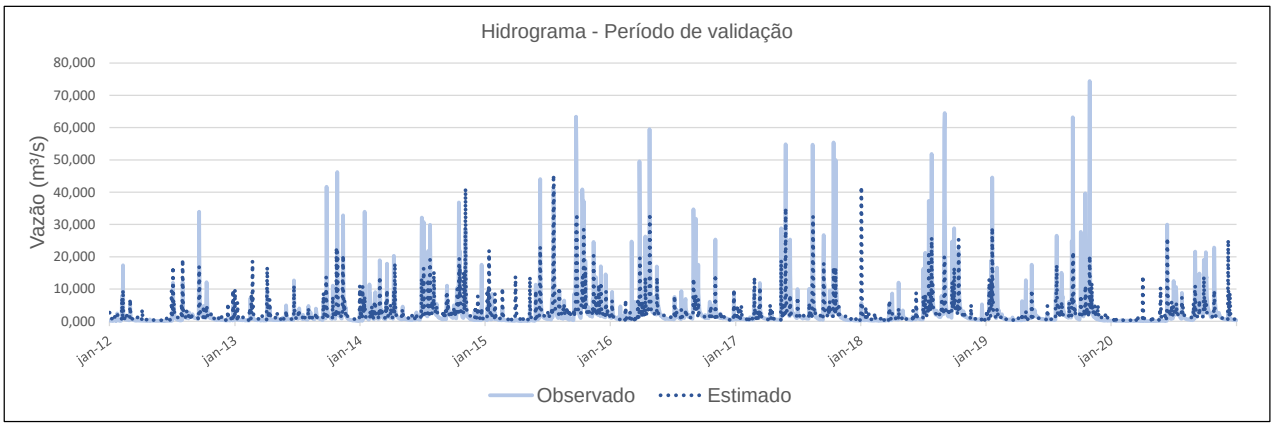


Figura 24: Hidrograma diário observado e estimado pelo modelo LASH para o período de validação na seção de controle da BHAF à montante da seção de controle "Ponte Passo dos Carros" (BHAF-PC).

Visualmente, observa-se que as estimativas da vazão foram próximas dos valores observados para o período. Nesse sentido, o modelo LASH gerou de forma satisfatória o comportamento hidrológico da BHAF-PC, tanto no período de calibração, como no de validação. Percebe-se que há uma subestimativa das vazões altas. Segundo CALDEIRA (2019) e VARGAS (2021), a subestimativa das vazões de pico é algo comum em modelagem hidrológica. Dentre os principais fatores, que podem estar relacionados a isso, estão a representatividade espacial das variáveis meteorológicas e o período de dados observados adotado para a modelagem.

Além disso, pode-se constatar a eficiência do modelo LASH através das estatísticas de desempenho, apresentadas na Tabela 22. Para isso, foram calculados os coeficientes referentes as funções $RMSE$, C_{NS}, $C_{NS-\log}$ e P_{BIAS}, conforme Equações 3.1-3.4, para as etapas de calibração e validação.

Etapa	$RMSE(m^3s^{-1})$	C_{NS}	$C_{NS-\log}$	$P_{BIAS}(\%)$
Período de calibração	3.66	0.62	0.64	19.81
Período de validação	3.92	0.57	0.64	17.09

Tabela 22: Estatísticas de desempenho do modelo LASH para as etapas de calibração e validação.

As estatísticas obtidas foram analisadas conforme apresentado na Seção 3.2. A estatística $RMSE$ apresenta o quão preciso é o modelo, sendo os melhores valores aqueles que se aproximam de zero. Com isso, os valores obtidos para a estatística $RMSE$ podem ser considerados satisfatórios. Já os valores obtidos para C_{NS}, C_{NS-log} e P_{BIAS} foram comparados aos respectivos intervalos de análise. A estatística C_{NS} indica a precisão do modelo em estimar as vazões de pico (CALDEIRA et al., 2019). Para os períodos de calibração e validação, essa estatística reflete uma boa precisão do modelo (0.54 a 0.65). Já a estatística representada por C_{NS-log} fornece a precisão do modelo em estimar vazões em períodos de seca. Nesse sentido, essa estatística indica que o modelo teve boa precisão nos resultados (0.54 a 0.65). Já a estatística P_{BIAS} gerou resultados que indicam uma estimativa satisfatória das vazões ($< 25\%$).

Para uma análise mais detalhada, obtiveram-se as curvas de permanência para os períodos de calibração e validação, sendo apresentadas nas Figuras 25 e 26, respectivamente. A curva de permanência relaciona a frequência com que as vazões são igualadas ou excedidas (CALDEIRA, 2019). Pode-se observar que, visualmente, as curvas de permanência foram bastante próximas nos períodos de calibração e validação.

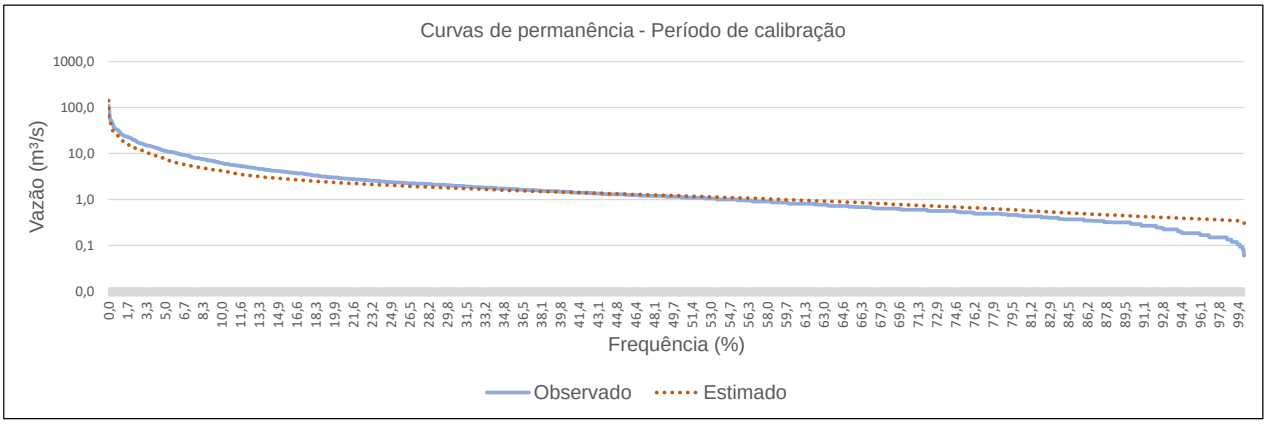


Figura 25: Curvas de permanência para a calibração do LASH, de acordo com os parâmetros calibrados na seção de controle da BHAF-PC.

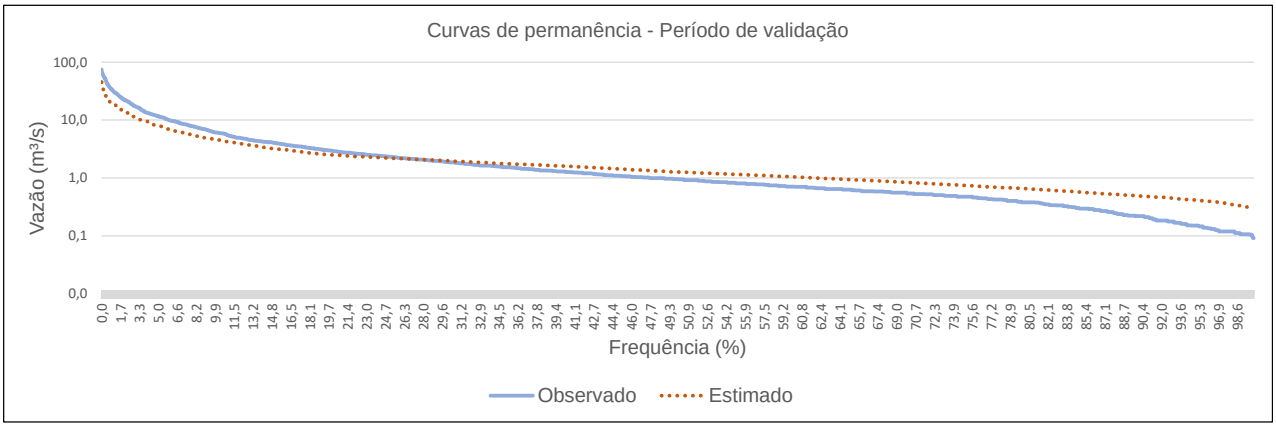


Figura 26: Curvas de permanência para a validação do LASH, de acordo com os parâmetros calibrados na seção de controle da BHAF-PC.

A curva de permanência é bastante utilizada para analisar, com maior detalhamento, a estimativa das vazões mínimas (VARGAS, 2021). De acordo com CALDEIRA (2019), a estimativa de vazões mínimas pode fornecer subsídios em situações de susceptibilidade a estiagens ou de determinação de vazões outorgáveis, por exemplo. Para isso, são determinados e analisados os quantis referentes às vazões mínimas. Na Tabela 23 tem-se algumas vazões de referência extraídas da curva de permanência, e as respectivas vazões observadas e estimadas.

Os resultados apresentados da Tabela 23 consolidam as análises realizadas através dos gráficos das Figuras 25 e 26. Com relação as vazões máximas, pode-se constatar que as vazões geradas pelo modelo LASH subestimam as vazões observadas. Em contrapartida, as

	Período de Calibração		Período de Validação	
Vazão de referência	Observada	Estimada	Observada	Estimada
$Q_{99\%}$	0.12	0.35	0.11	0.33
$Q_{95\%}$	0.18	0.39	0.15	0.41
$Q_{90\%}$	0.29	0.44	0.22	0.49
$Q_{80\%}$	0.46	0.59	0.38	0.66
$Q_{70\%}$	0.60	0.77	0.54	0.83
$Q_{60\%}$	0.81	0.98	0.71	1.05
$Q_{50\%}$	1.15	1.21	0.95	1.27
$Q_{40\%}$	1.48	1.45	1.29	1.60
$Q_{30\%}$	2.03	1.78	1.89	1.99
$Q_{20\%}$	3.00	2.34	2.94	2.49
$Q_{10\%}$	6.21	4.14	6.05	4.60

Tabela 23: Vazões de referência da curva de permanência, vazões observadas e vazões estimadas na seção de controle "Passo dos Carros", da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC).

vazões mínimas tendem a superestimar as vazões observadas. Entretanto, percebe-se que para o período de calibração as estimativas foram bastante próximas.

No geral, o modelo LASH captou o comportamento das vazões, gerando estimativas satisfatórias para o propósito deste trabalho. Os resultados mostram que o comportamento hidrológico da BHAF-PC pode ser simulado conforme os parâmetros calibrados pelo LASH. Além disso, estendeu-se os resultados para toda a região da BHAF, isto é, os parâmetros calibrados foram utilizados para simular o modelo acoplado, considerando a BHAF, suas 39 sub-bacias e seu exutório como ponto de descarga hídrica da bacia. Dessa forma, em cada cenário de mudança no uso do solo, as vazões estimadas pelo modelo LASH fornecem valores gerais para o SMA simulado em GAMA, a saber: vazão mínima, vazão média e vazão máxima. Na próxima seção, são apresentados os resultados e discussões referentes ao modelo acoplado sócio-hidrológico, onde são comparadas algumas das vazões observadas e estimadas.

4.2 Simulações do modelo sócio-hidrológico

4.2.1 Cenário 1: Mudanças do uso do solo em toda a região

Como comentado na Seção 3.4, o cenário 1 foi realizado apenas para gerar resultados imediatos sobre a mudança no ambiente. Nesse sentido, simulou-se as vazões após a mudança do uso do solo, de maneira que todo o ambiente fosse coberto por: pastagem, agricultura, solo exposto ou silvicultura. Na Figura 27 pode-se observar a região da BHAF em cada simulação.

Pode-se observar que o ambiente da BHAF, simulado em GAMA, apresenta o mapa de uso do solo original, mesmo depois de simulado. Entretanto, após a mudança no uso do solo, o ambiente passa a ter uma nova coloração e tonalidade. Essa forma de representação é gerada pois, na ferramenta GAMA, os mapas são colocados em camadas. A camada referente a malha de células é sobreposta ao mapa da região da bacia, e é exposto com 70% de transparência, para que seja possível visualizar os mapas da BHAF, os usos do solo e cada sub-bacia. A partir

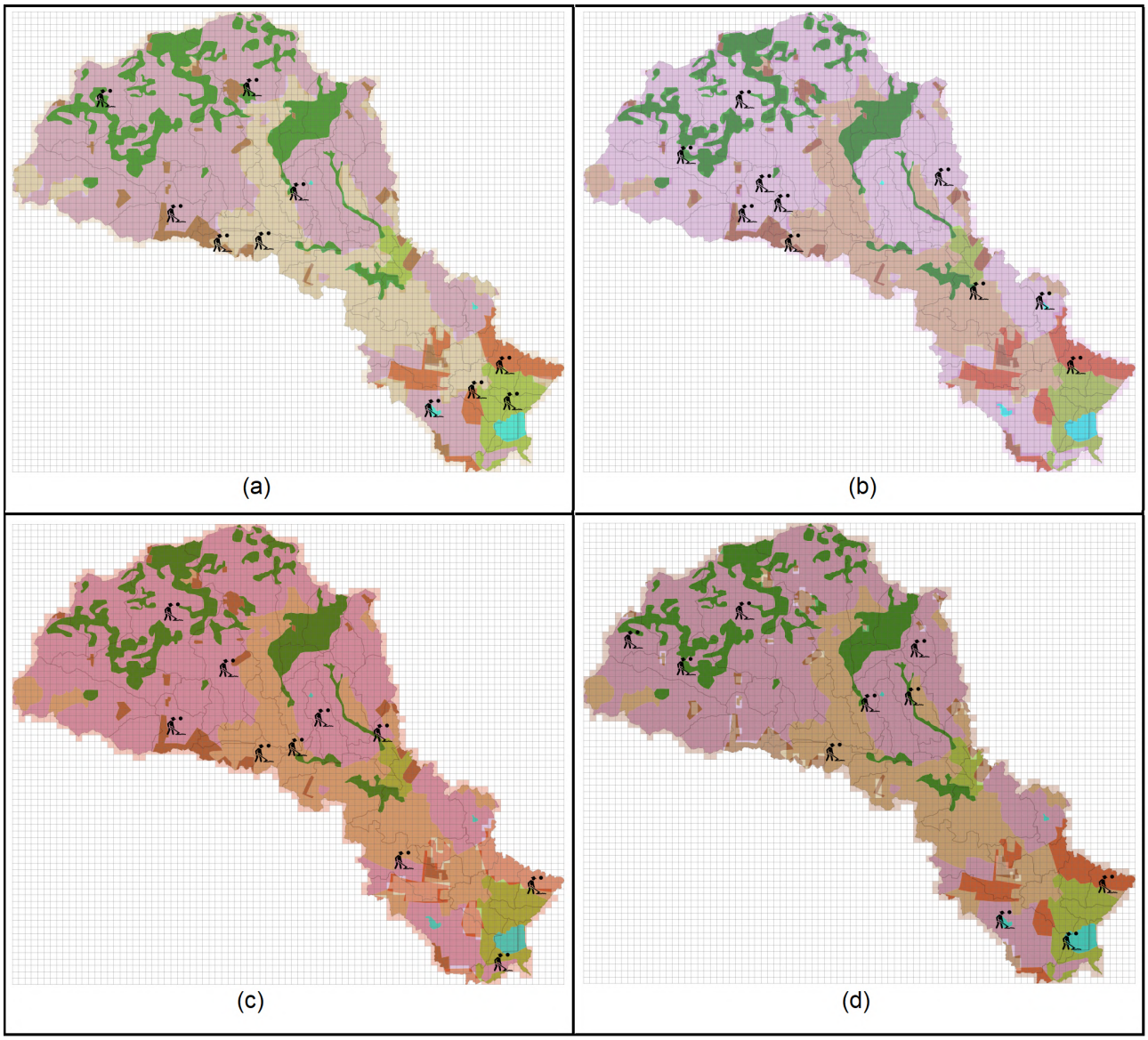


Figura 27: Mudança do uso do solo em 100% da BHAF em GAMA para: (a) pastagem; (b) agricultura; (c) solo exposto; e (d) silvicultura.

da mudança do uso do solo em uma célula, a mesma recebe a respectiva cor definida para o tipo de uso do solo, de acordo com o mapa apresentado na Figura 11.

Neste cenário, o SMA foi simulado apenas durante 14 ciclos em GAMA (correspondendo a 1 ano e 3 meses), e após foram simuladas as vazões na ferramenta LASH. Para isso, os parâmetros do uso do solo foram atualizados de acordo com a Tabela 14. Nas Figuras 28-31 tem-se os hidrogramas estimados em cada caso, comparados ao hidrograma estimado atual para a BHAF, utilizando os dados temporais e espaciais de 2001 a 2020.

A partir das vazões simuladas, pode-se perceber inicialmente que as mudanças para silvicultura e solo exposto foram as que geraram maiores impactos no sistema hidrológico. Um dos fatores para que isso ocorra pode estar vinculado ao fato de que esses usos do solo possuem os menores percentuais de ocupação do uso do solo na BHAF (silvicultura 3.7% e solo exposto 4.5%), com exceção da ocupação referente a água (0.8% de ocupação da BHAF), de acordo

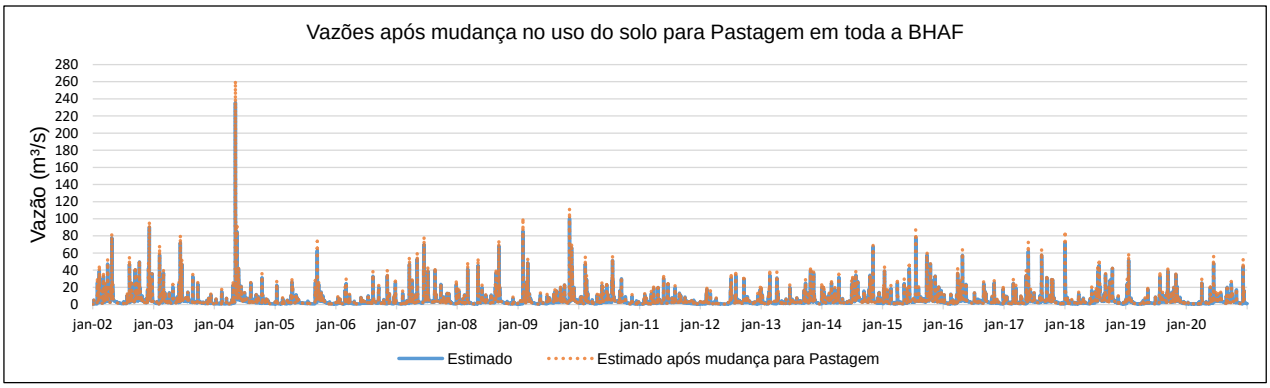


Figura 28: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para pastagem.

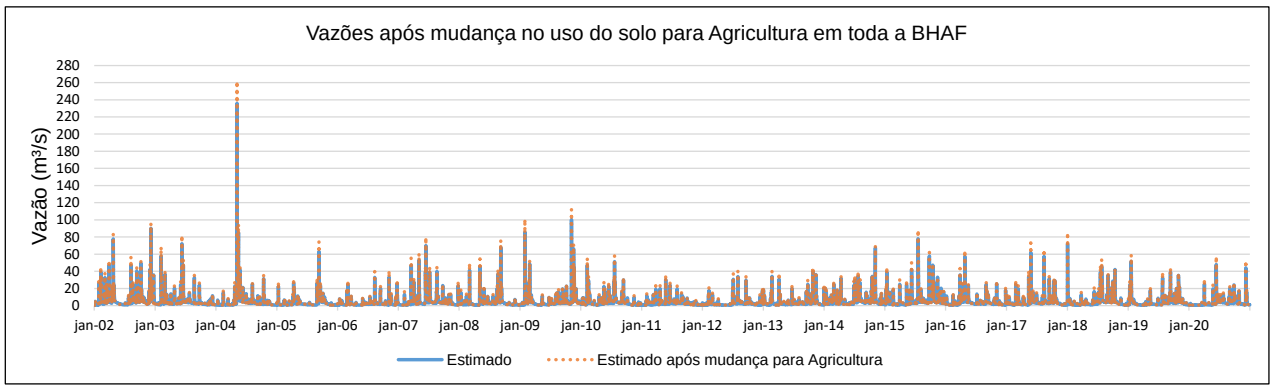


Figura 29: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para agricultura.

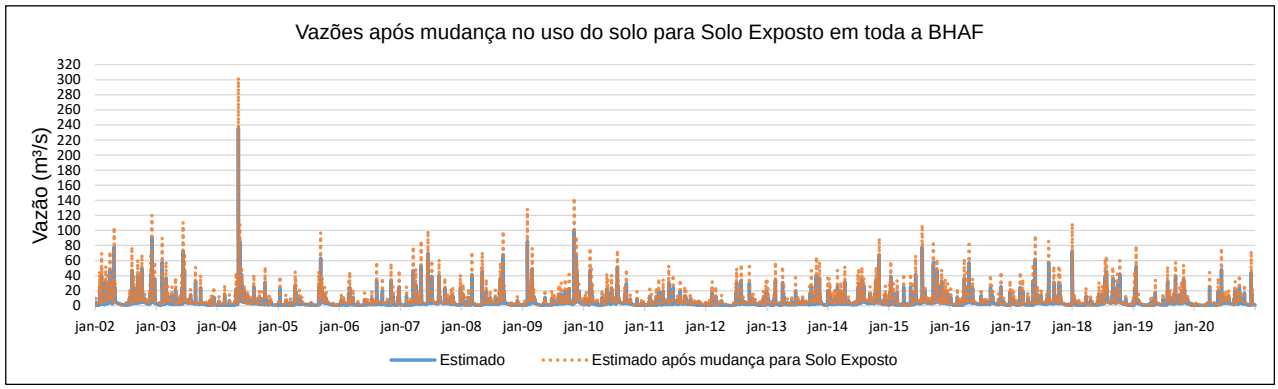


Figura 30: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para solo exposto.

com o mapa de uso e cobertura do solo (Figura 11) e os dados da Tabela 13. Nesse sentido, os parâmetros hidrológicos associados a cada tipo de uso são modificados na região, causando grandes impactos hidrológicos.

Por outro lado, observa-se que os resultados para os casos de mudança total do ambiente para pastagem e agricultura foram similares, e geraram menos impactos no ambiente. Neste caso,

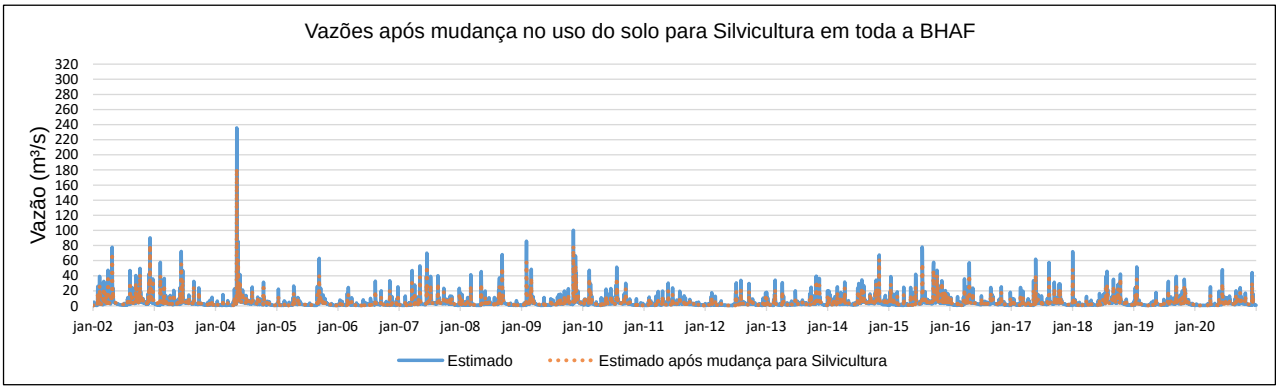


Figura 31: Hidrograma diário estimado atual e simulado após mudança no uso do solo para silvicultura.

pode-se relacionar a isso o fato de que os parâmetros do uso do solo sofrem pequenas variações de um uso do solo para o outro, como exposto na Tabela 14. Além disso, a agricultura e a pastagem ocupam juntas cerca de 73% de toda região da BHAF (50.1% agricultura e 22.9% pastagem). Dessa forma, é esperado que os impactos sejam menores se comparados a outras modificações no uso do solo.

Os gráficos das Figuras 32, 33 e 34 apresentam, respectivamente, as vazões mínimas, médias e máximas estimadas para o caso atual e para cada simulação do cenário 1. Com relação as mínimas e médias anuais absolutas, pode-se visualizar impactos importantes na região. Entretanto, as vazões máximas anuais indicam a maior produção de água e, neste caso, a mudança para solo exposto e silvicultura foram as que geraram maior impacto no ambiente.

Segundo MELLO et al. (2008), estudos sobre a mudança no uso do solo, considerando cenários de reflorestamento ou desmatamento, apresentam diferentes resultados quanto ao escoamento em uma bacia hidrográfica. BESKOW; NORTON; MELLO (2013) analisaram as mudanças do uso do solo considerando a conversão de áreas de pastagem para eucalipto, em uma pequena sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Grande. Os resultados indicaram que o reflorestamento afeta negativamente a produção de água para os reservatórios da bacia, pois gera uma diminuição na produção de água no ambiente.

Por outro lado, estudos apontam que o desmatamento em regiões hidrográficas geram aumentos nas vazões (VIOLA et al., 2014; CUNHA, 2021). Nesse sentido, percebe-se que os resultados do cenário 1 apontam para esse resultado, visto que a mudança no uso do solo para solo exposto gera os maiores valores para as vazões. Alguns fatores para que isso ocorra estão associados a redução da evapotranspiração e de infiltração e volume de água no solo.

Diante do exposto nesta seção, pode-se constatar que apenas modificando os parâmetros do uso do solo, em toda região do ambiente, o sistema hidrológico simulado em LASH gerou impactos consideráveis para a BHAF. Na próxima seção, são apresentados os resultados considerando as mudanças no uso do solo, segundo as tendências apresentadas na Tabela 15. Além disso, é analisado o SMA quanto a negociação entre os agentes.

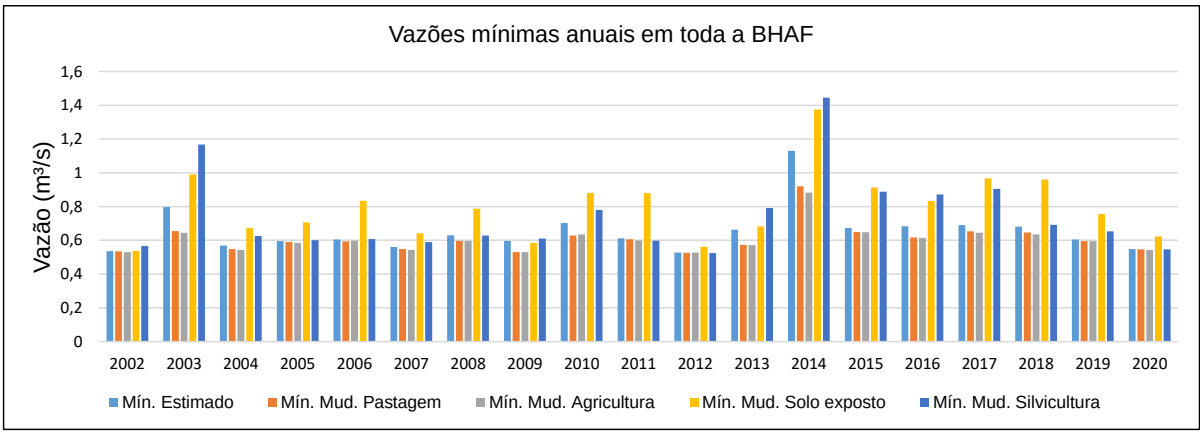


Figura 32: Vazões mínimas anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura.

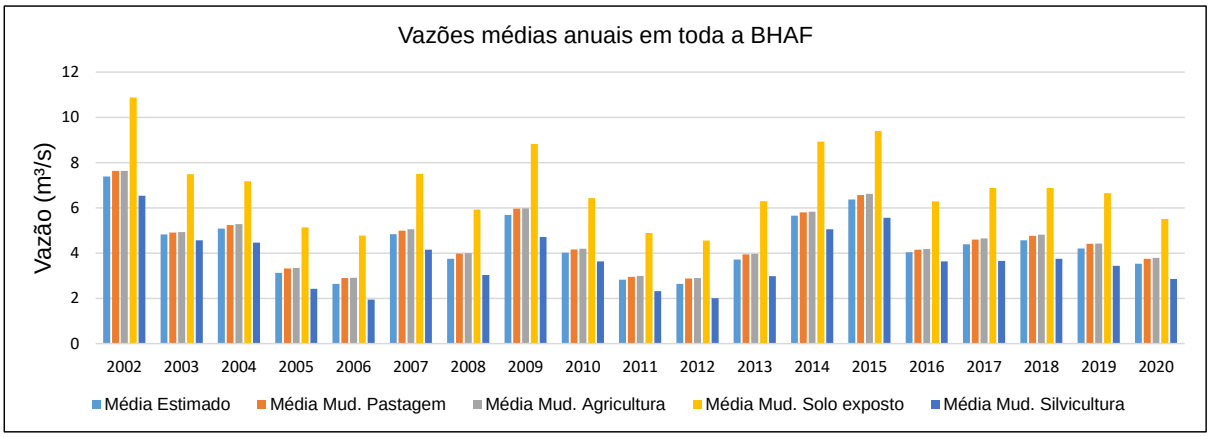


Figura 33: Vazões médias anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF para: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura.

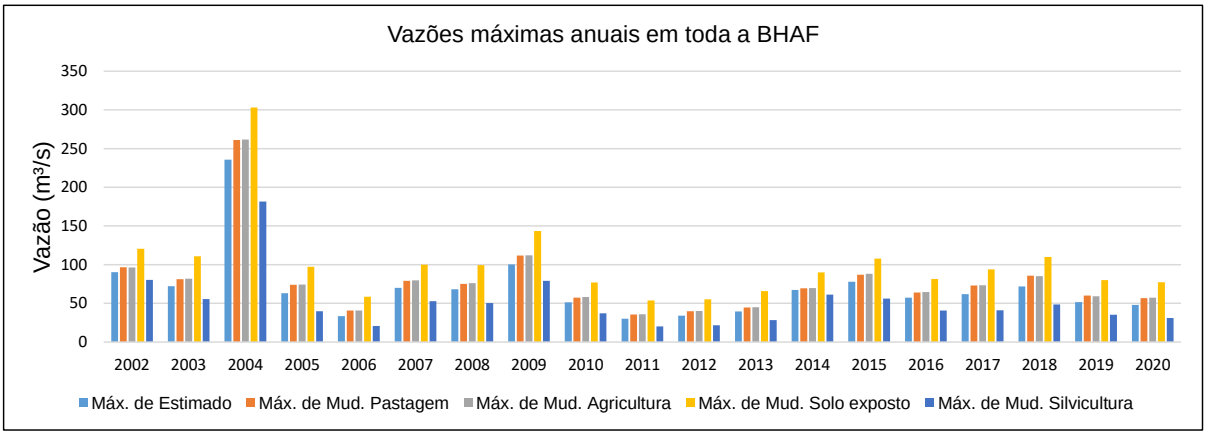


Figura 34: Vazões máximas anuais atuais e simuladas após mudança no uso do solo em todo o ambiente da BHAF: pastagem, agricultura, solo exposto e silvicultura.

4.2.2 Cenário 2: Mudanças do uso do solo de acordo com as tendências

A partir de agora, os resultados apresentados são referentes ao modelo acoplado, isto é, é analisado o comportamento do sistema sócio-hidrológico através do SMA e do MCV. O cenário 2 contempla a mudança do uso do solo no ambiente, através das tendências analisadas nos últimos anos, das quais foram apresentadas na Tabela 15. Para simular o comportamento do sistema, foram consideradas duas situações, uma considerando 10% e outra 20% de mudança do uso do solo total na região. Como o ambiente no SMA foi discretizado em uma malha com 2574 células ocupadas (células quadradas de 300 m de lado), essas porcentagens equivalem respectivamente a 257 e 515 células modificadas. Dessa forma, foram feitas 10 simulações para cada situação do cenário 2, onde os parâmetros iniciais podem ser visualizados na Figura 35.

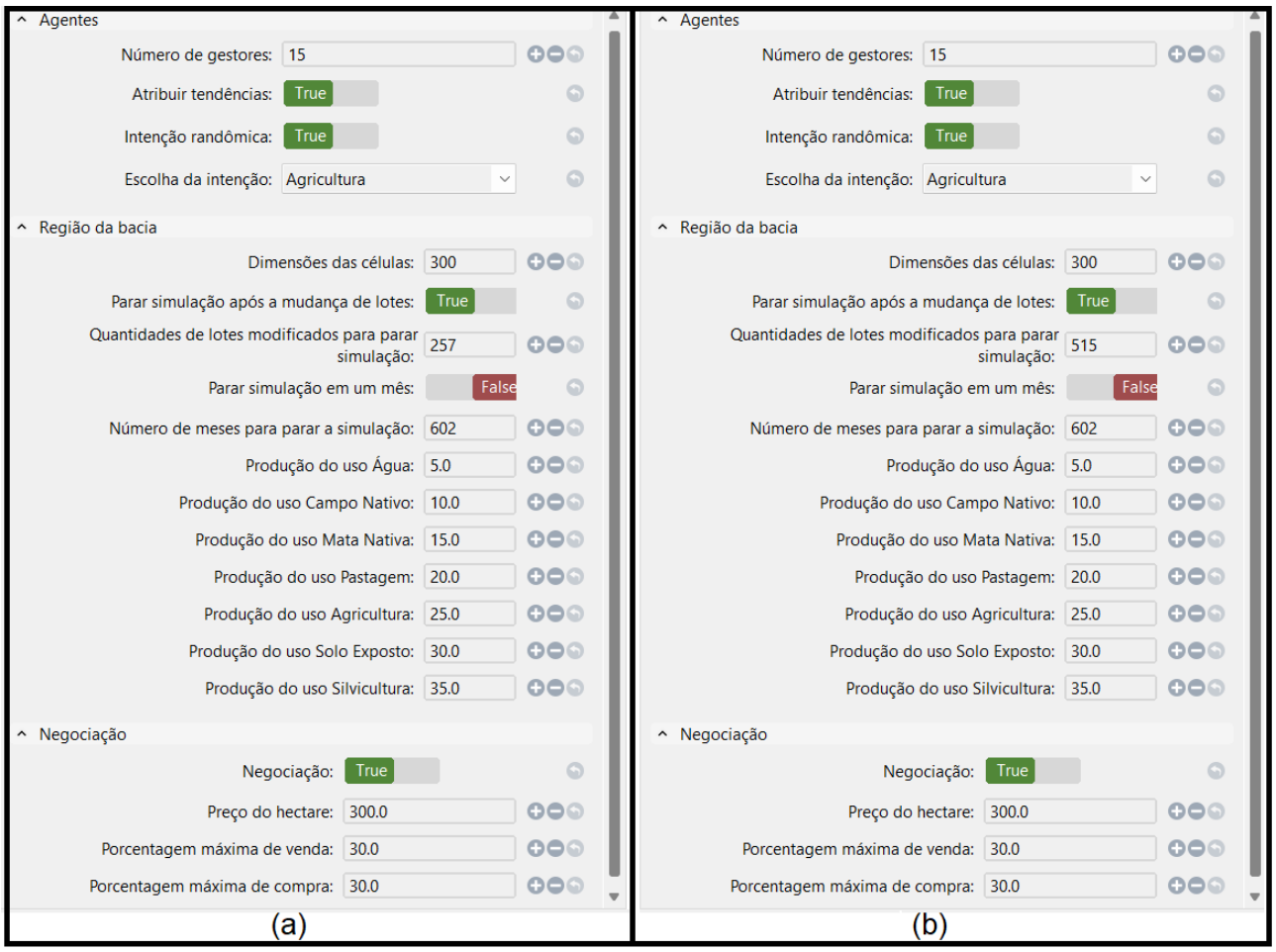


Figura 35: Parâmetros iniciais para o cenário 2, considerando: (a) 10% de mudança do uso do solo no ambiente - 257 células; e (b) 20% de mudança do uso do solo no ambiente - 515 células.

O objetivo principal de análise do cenário 2 foi determinar o impacto hidrológico ao modificar a região. Neste caso, analisou-se a mudança realizada, o tempo final para atingir a mudança determinada, e as vazões simuladas no modelo LASH, após a mudança no uso do solo no SMA. Em todas as simulações do cenário 2, o erro percentual (E_P - Equação 3.48) foi desprezado para que a mudança no uso do solo ocorresse de forma mais rápida no ambiente.

Cenário 2 - Situação 1

Nas Figuras 36 e 37, tem-se os ambientes finais do SMA, em cada simulação, após a mudança de 10% do uso do solo ser atingida. Além disso, na Tabela 24, tem-se a quantidade de ciclos em cada simulação, e a respectiva conversão, utilizando a escala temporal em anos.

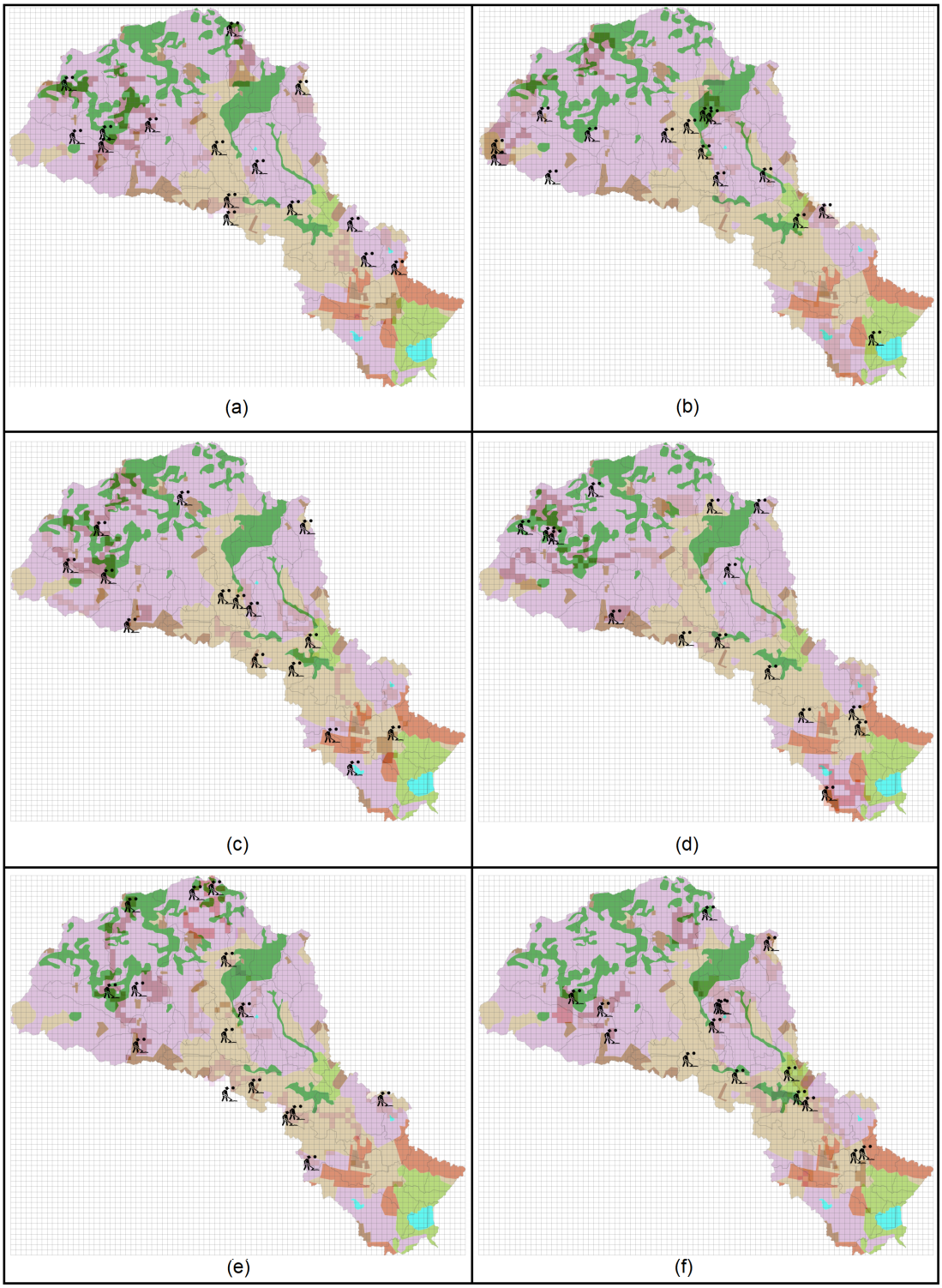


Figura 36: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 10% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6.

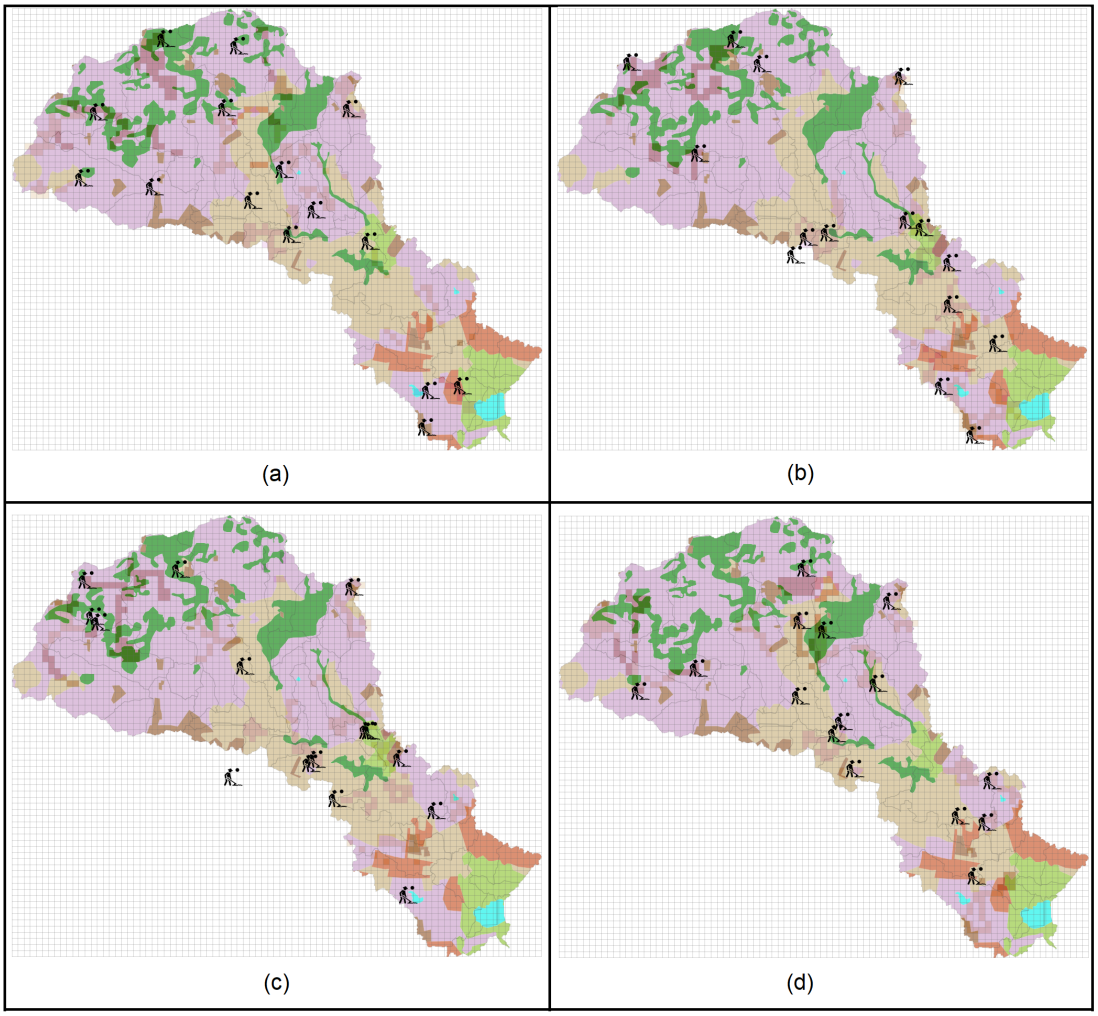


Figura 37: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 10% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Ciclos	148	188	163	192	125	139	134	136	139	108
Anos	12,3	15,7	13,6	16	10,4	11,6	11,2	11,3	11,6	9

Tabela 24: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

A partir disso, pode-se comparar os resultados apresentados com os valores da Tabela 25, onde tem-se as quantidades de células totais de cada uso do solo no início e no final de cada simulação. O ambiente de simulação e os dados tabelados geram resultados imediatos, isto é, percebe-se que na maioria dos casos, as maiores mudanças ocorreram ou para pastagem ou para silvicultura. Em contrapartida, observa-se que os demais usos do solo diminuíram suas áreas de ocupação no ambiente. Isso ocorre de acordo com as tendências de mudança no uso do solo (Tabela 15), onde pode-se analisar que a tendência que mais ocorre é a mudança para pastagem e para silvicultura, principalmente nas sub-bacias com maiores áreas. As simulações com o menor e o maior números de ciclos foram, respectivamente, as simulações 10 e 4, com 108 e 192 ciclos. Como a escala temporal do SMA foi definida como anual, esses valores podem

ser convertidos em 9 e 16 anos, respectivamente. Na sequência, cada simulação será comentada separadamente, onde serão apresentados os principais resultados e gráficos obtidos.

Uso do solo	I	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Água	20	18	17	20	17	19	20	18	19	19	20
Campo Nativo	130	126	124	127	129	129	115	124	111	118	126
Mata Nativa	325	279	264	274	290	282	290	280	296	285	281
Pastagem	576	573	700	651	637	581	665	669	626	659	691
Agricultura	1287	1207	1156	1166	1135	1213	1185	1160	1247	1207	1150
Solo Exposto	125	122	121	111	160	161	125	127	109	120	133
Silvicultura	111	249	192	224	206	189	169	195	164	164	171

Tabela 25: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

Na Figura 38, tem-se o gráfico que representa a mudança total do uso do solo a partir da quantidade de células contabilizadas, na simulação 1. Observa-se que a maior mudança ocorreu para silvicultura, gerando algumas poucas mudanças para agricultura e pastagem. Neste caso, cerca de 4.3% da malha de células da região possuía uso do solo ocupado por silvicultura, e essa porcentagem passou a ser 9.7%. As áreas referentes a agricultura e a mata nativa foram as mais atingidas durante a simulação 1. Agricultura passou de 50.0% para 46.9% do ambiente, e mata nativa de 12,6% para 10,8% do ambiente.

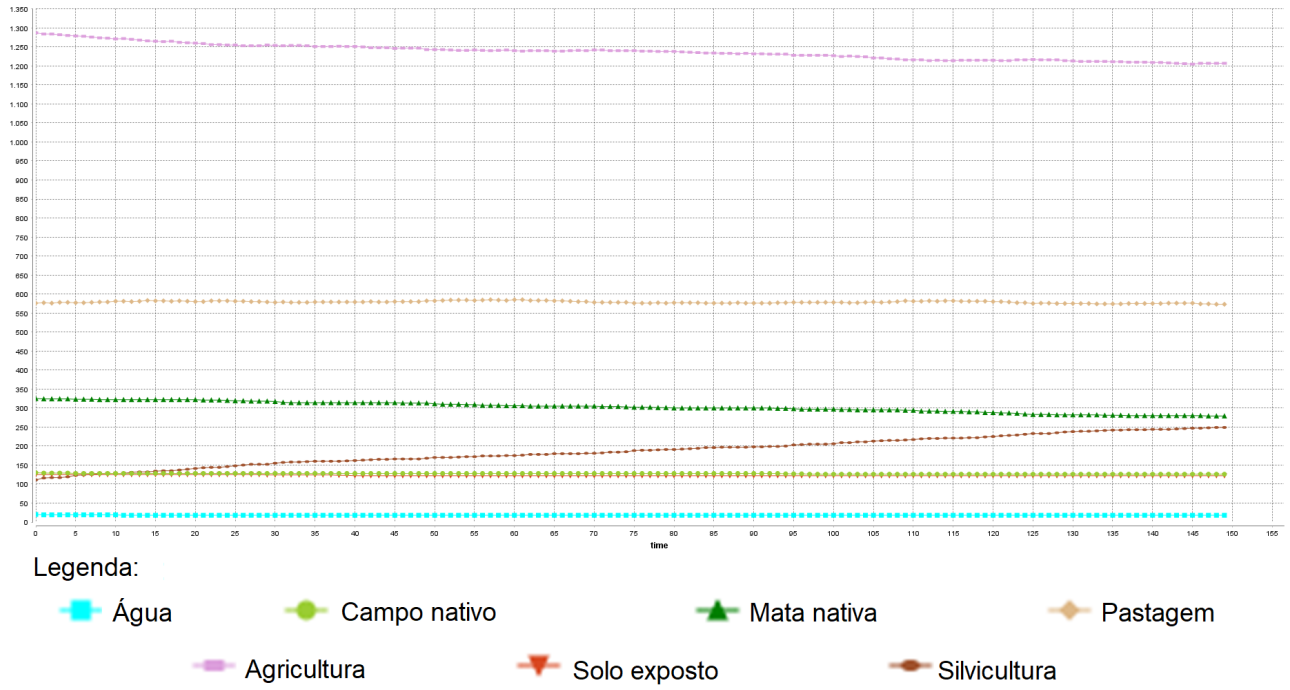


Figura 38: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

Quanto as vazões estimadas durante as simulações, observou-se que as vazões médias permaneceram com um comportamento pouco variável. Dessa forma, serão apresentadas apenas

as vazões mínimas e máximas. Para a simulação 1, tem-se as Figuras 39 e 40, respectivamente. Nota-se que, a vazão mínima inicialmente cresce e depois tende ao seu valor inicial. Já a vazão máxima decresce ao longo da simulação, exceto nos ciclos equivalentes aos anos seis e oito. Isso pode ser consequência de que, em casos de reflorestamento, o ambiente tende a apresentar uma quantidade menor de produção de água no ambiente, como comentado na Seção 4.2.1.

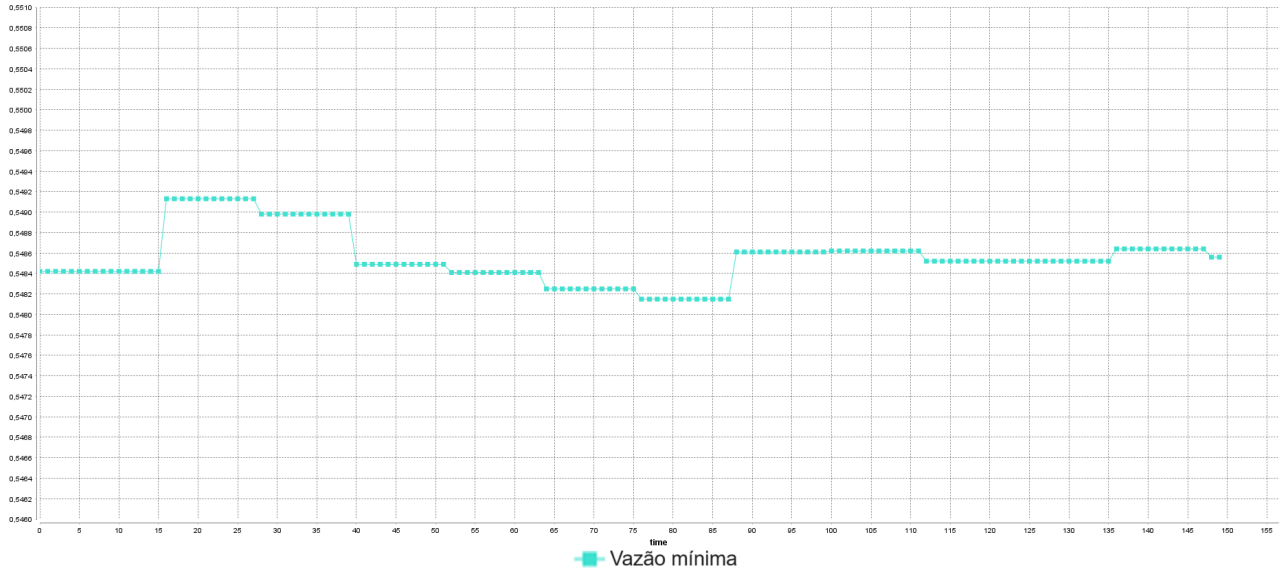


Figura 39: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

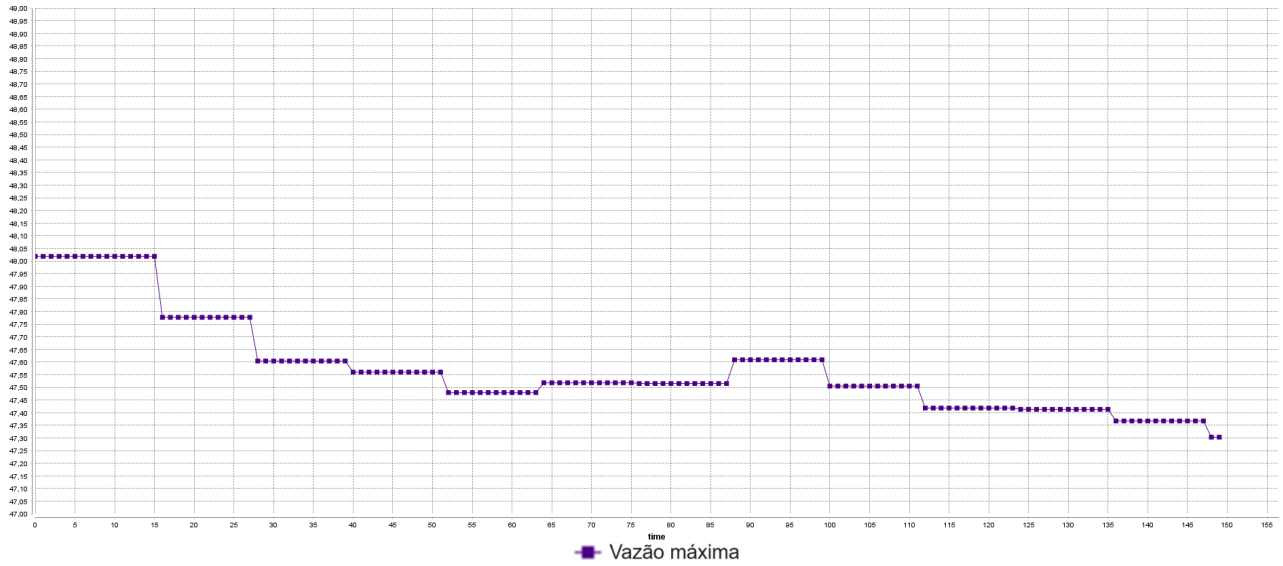


Figura 40: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

A Figura 41 mostra a mudança do uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 2. Nela pode-se visualizar que houve uma modificação maior no uso do solo para a pastagem e silvicultura. Anteriormente, a pastagem ocupava aproximadamente 22.38% do ambiente.

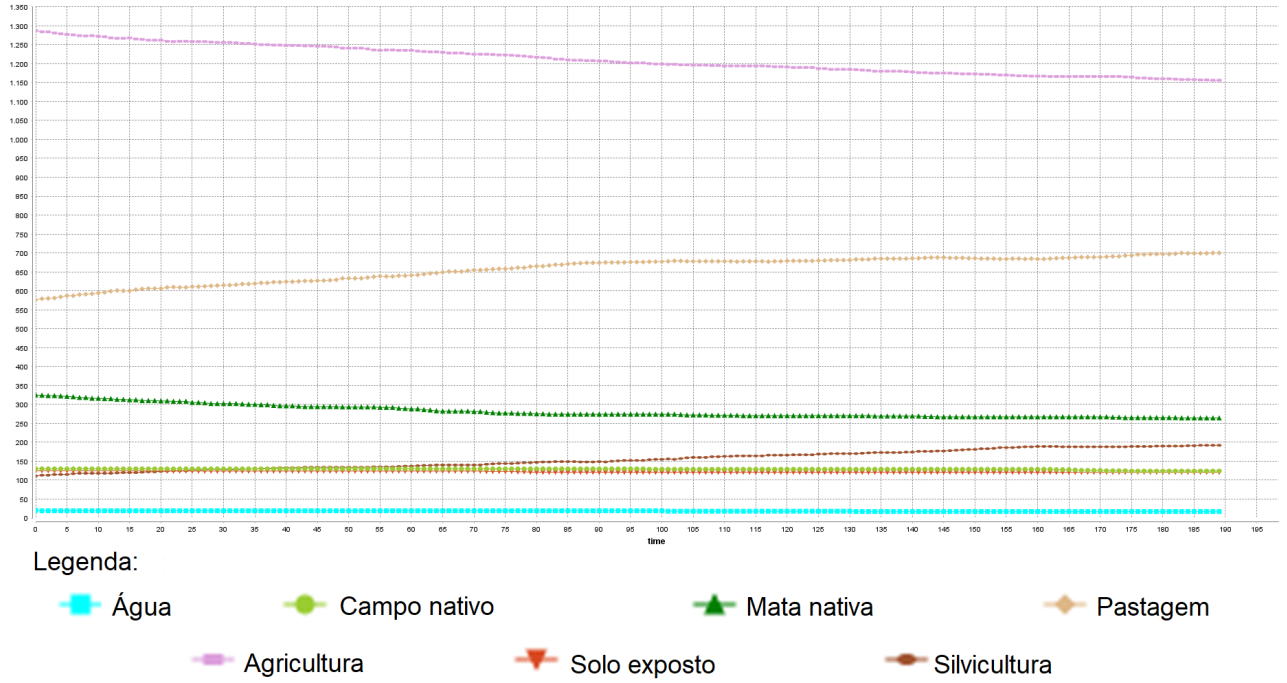


Figura 41: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

Após a mudança, tem-se 27.2% da região ocupada por pastagem, e 7.46% por silvicultura. Novamente, os usos do solo mais prejudicados foram mata nativa e agricultura, que, neste caso, passaram a conter 10.26% e 44.91%, respectivamente, de área ocupada.

No que diz respeito as vazões mínimas e máximas simuladas, pode-se visualizar os comportamentos nas Figuras 42 e 43. Observa-se que, para esta simulação, as vazões mínimas oscilaram ao longo dos anos simulados. Já as vazões máximas cresceram até o ciclo 99, e a partir disso decresceram até o ciclo 183. Da Figura 42, nota-se que as mudanças ocorreram de forma mais rápida do início da simulação até o ciclo 100, aproximadamente. Dessa forma, pode-se visualizar que enquanto as mudanças para pastagem e silvicultura aumentam, as regiões de agricultura e mata nativa diminuem de forma mais rápida, o que influencia diretamente nas vazões.

Na Figura 44 tem-se a mudança no uso do solo total ao longo da simulação 3, no SMA. Visualmente, percebe-se que as simulações 2 e 3 possuem similaridades, entretanto as mudanças ocorridas são distintas. Na simulação 3, as maiores mudanças ocorrem para pastagem e para silvicultura, onde passam a ocupar cerca de 25.29% e 8.70% do ambiente, respectivamente. Dessa forma, a mudança mais significativa é para silvicultura. Por outro lado, mata nativa e agricultura sofrem perda em suas regiões, passando a ocuparem cerca de 10.64% e 45.30% da região, respectivamente.

As vazões mínimas simuladas durante a simulação 3 estão apresentadas na Figura 45. Neste caso, seu valor alternou em torno do valor inicial. Já as vazões máximas atingiram um valor de estabilidade logo abaixo de seu valor inicial. A estabilidade pode ocorrer visto que no SMA a mudança foi gerada de forma mais impactante até o ciclo 80 aproximadamente, como pode ser observado na Figura 44. Além disso, enquanto a mudança no uso do solo para pastagem

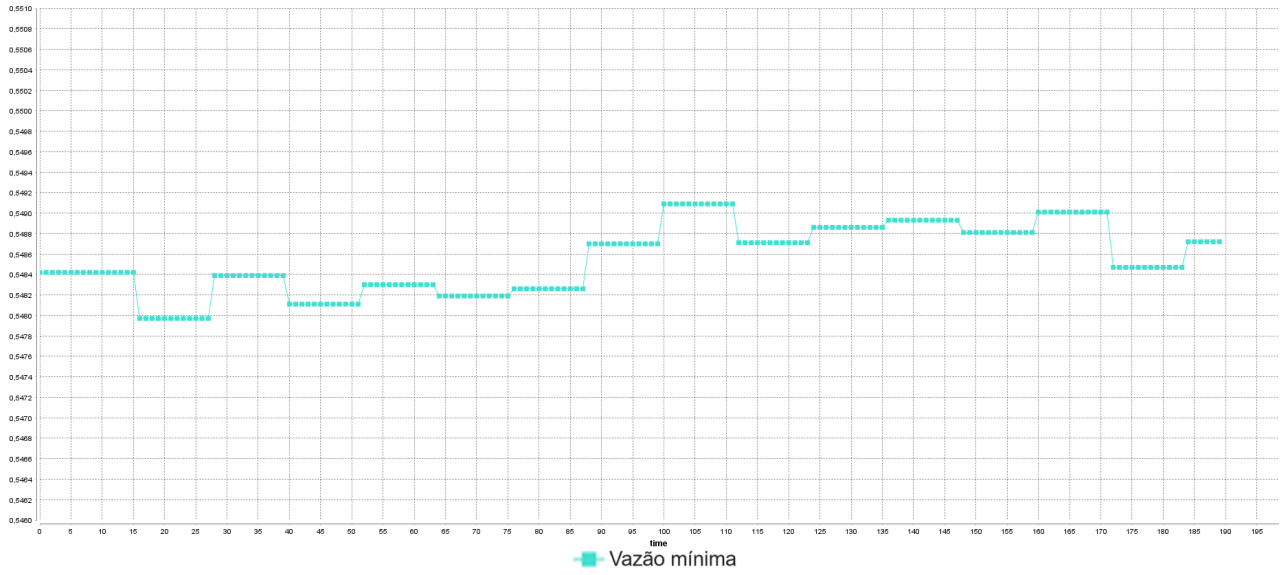


Figura 42: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

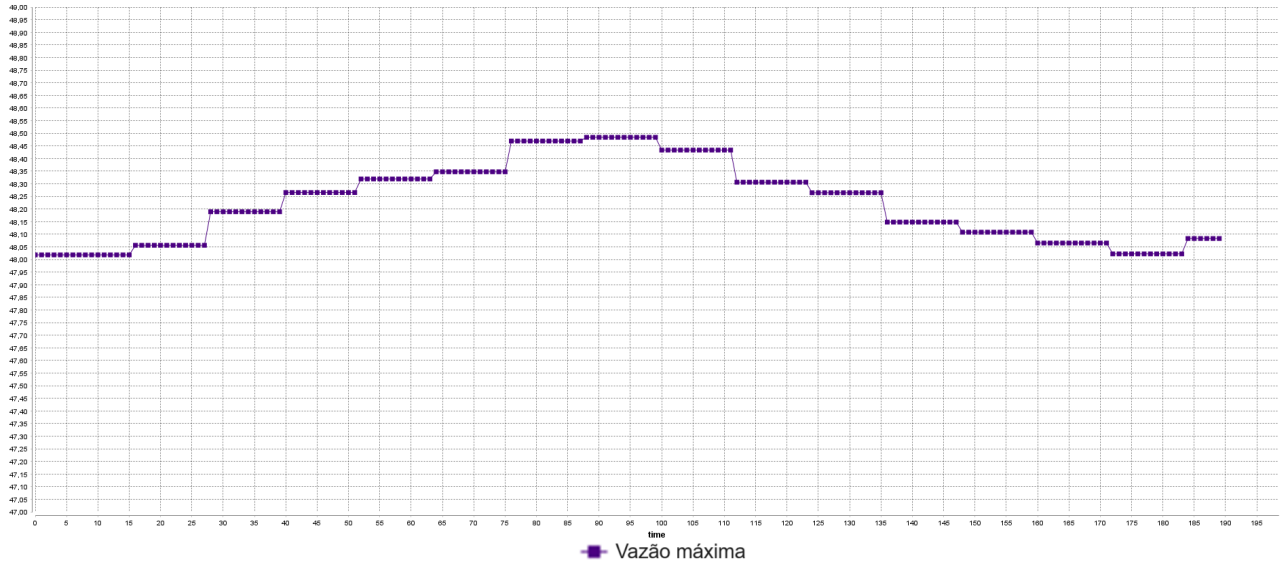


Figura 43: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

ocorria, a agricultura diminuía sua área de ocupação de forma quase proporcional, trazendo equilíbrio a alguns atributos do sistema.

A Figura 47 mostra a mudança no uso do solo para a simulação 4. Para este caso, as principais modificações do uso do solo ocorreram para pastagem, de 22.38% para 24.75%, solo exposto, de 4.86% para 6.22%, e silvicultura, de 4.31% para 8%. As regiões mais afetadas foram agricultura e mata nativa, das quais resultaram em 44.09% e 11.27%, respectivamente.

Nesta simulação, enquanto as vazões mínimas tiveram um aumento significativo, as vazões máximas decresceram. Os comportamentos atrelados a estas vazões podem ser visualizados nas Figuras 47 e 48. Os fatores que possivelmente influenciaram esses resultados foram a mudança

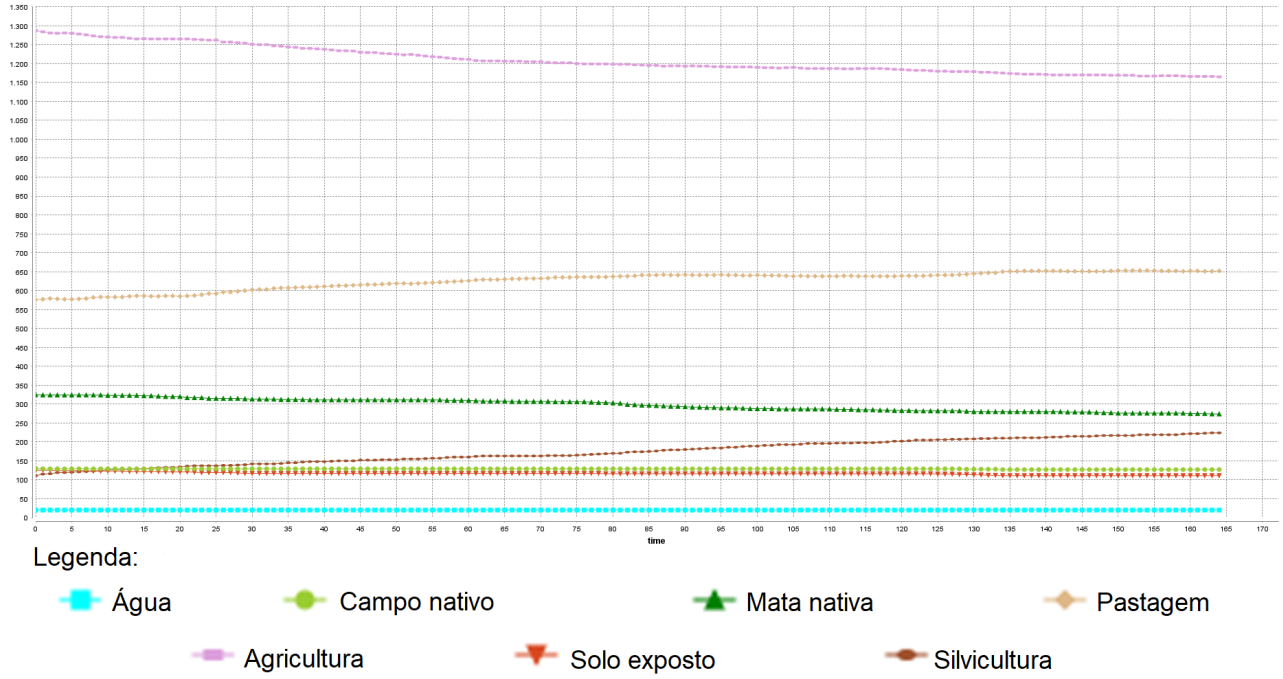


Figura 44: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

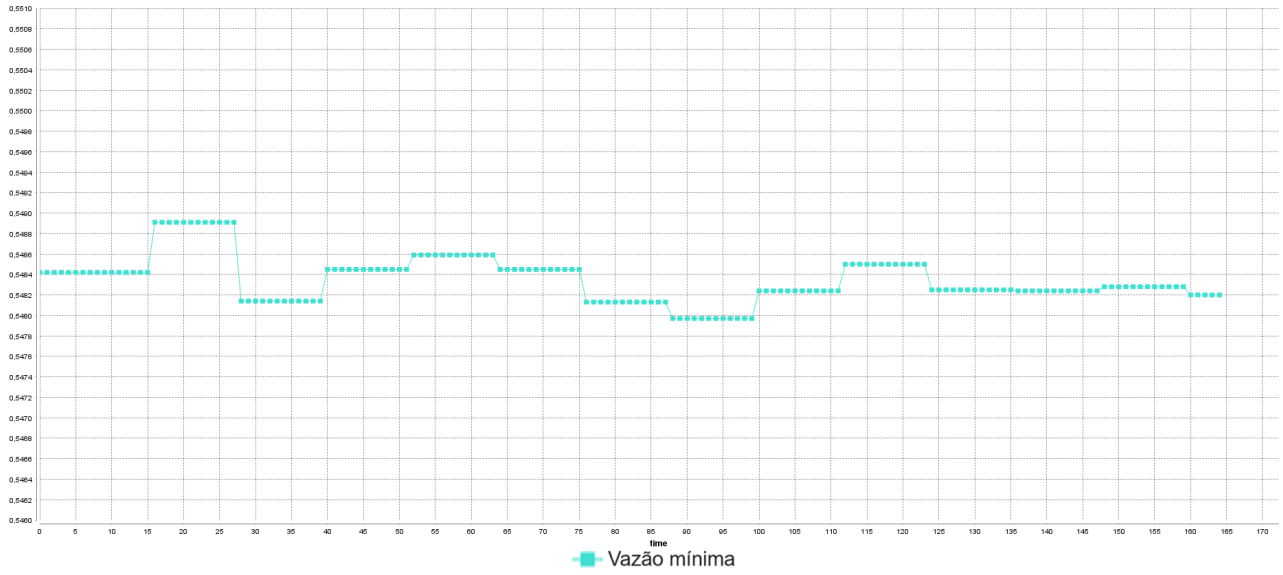


Figura 45: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

para silvicultura, da qual foi a mais importante, e o impacto na agricultura, uma vez que estão em concordância com os resultados apresentados na Seção 4.2.1.

A simulação do cenário 5 é apresentada na Figura 50, onde pode-se observar a mudança no uso do solo a cada ciclo. Neste caso, as maiores mudanças ocorreram para solo exposto, chegando a 6.25% do ambiente, e silvicultura, ocupando 7.34% do ambiente. Em contrapartida, mata nativa passou a ocupar 10.96% da região e agricultura 47.13%.

Esta simulação apresentou oscilação nas mudanças no uso do solo, ao longo dos ciclos. Isso

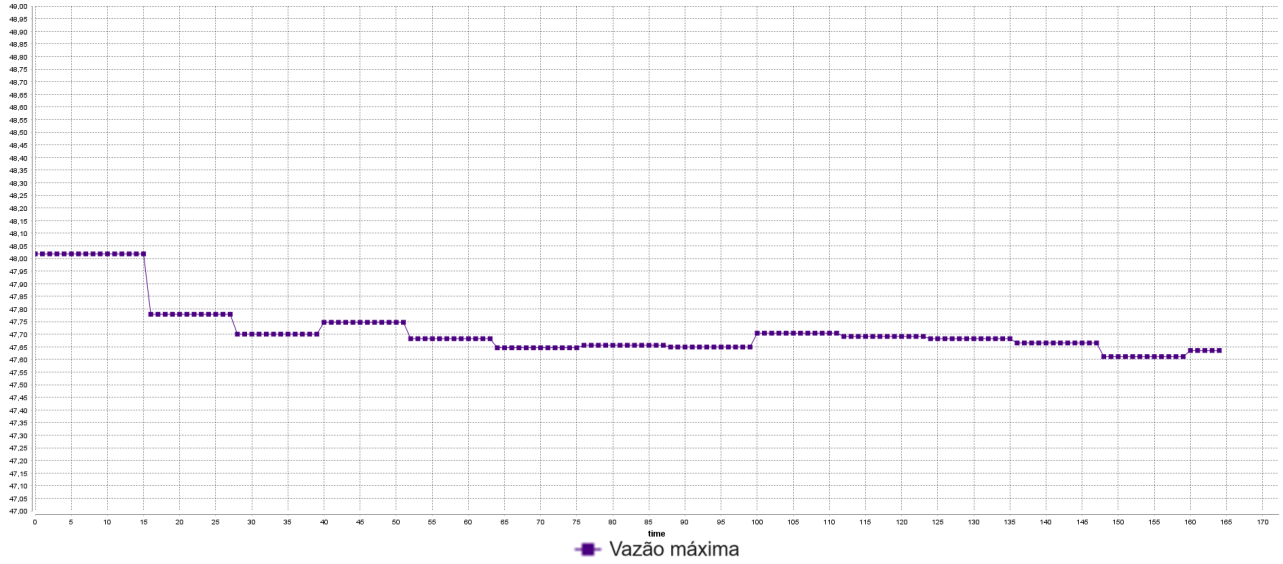


Figura 46: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

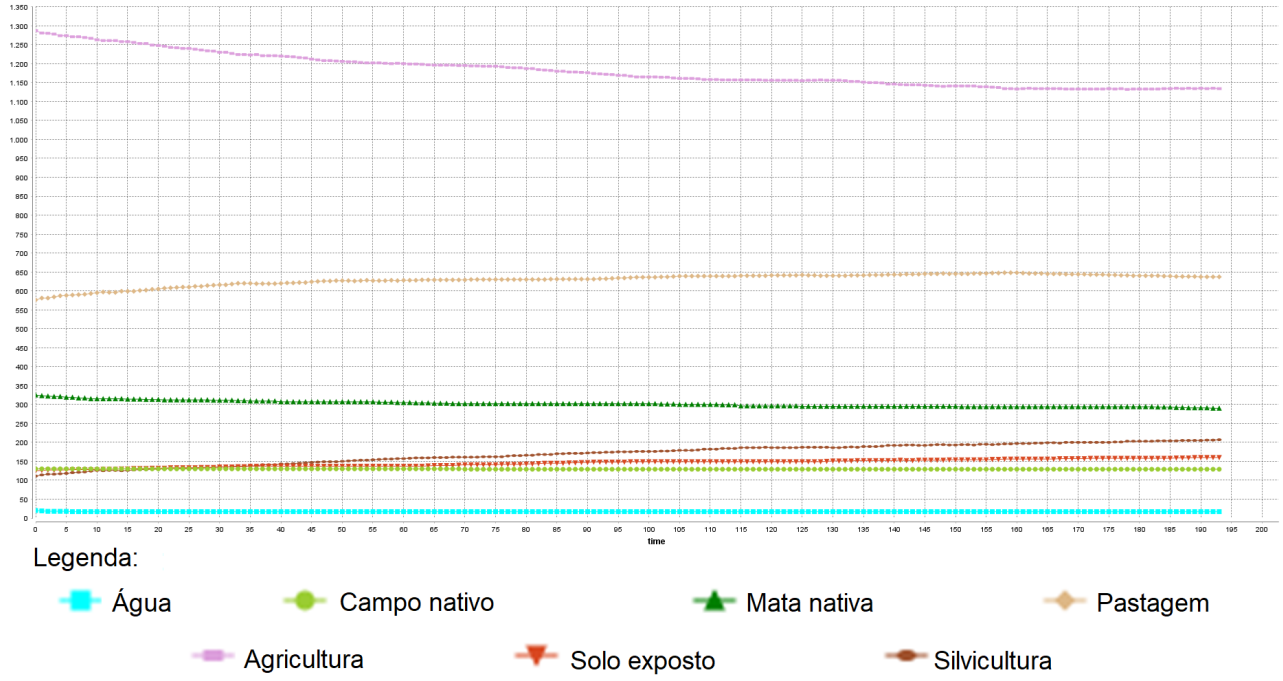


Figura 47: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

gerou oscilações nas vazões mínimas e máximas, o que pode ser visualizado nas Figuras 50 e 52. Entretanto, percebe-se um leve aumento nas regiões voltadas a silvicultura e solo exposto, uma diminuição de mata nativa, e uma estabilidade na agricultura. Isso influencia no sistema hidrológico, gerando um aumento das vazões mínimas e máximas.

Na Figura 53, tem-se a mudança no uso do solo referente a simulação 6. Neste caso, as maiores mudanças ocorreram para pastagem, de 22.38% para 25.84%, e para silvicultura, de 4.31% para 7.34% do ambiente. As regiões de maiores perdas ocorreram para agricultura,

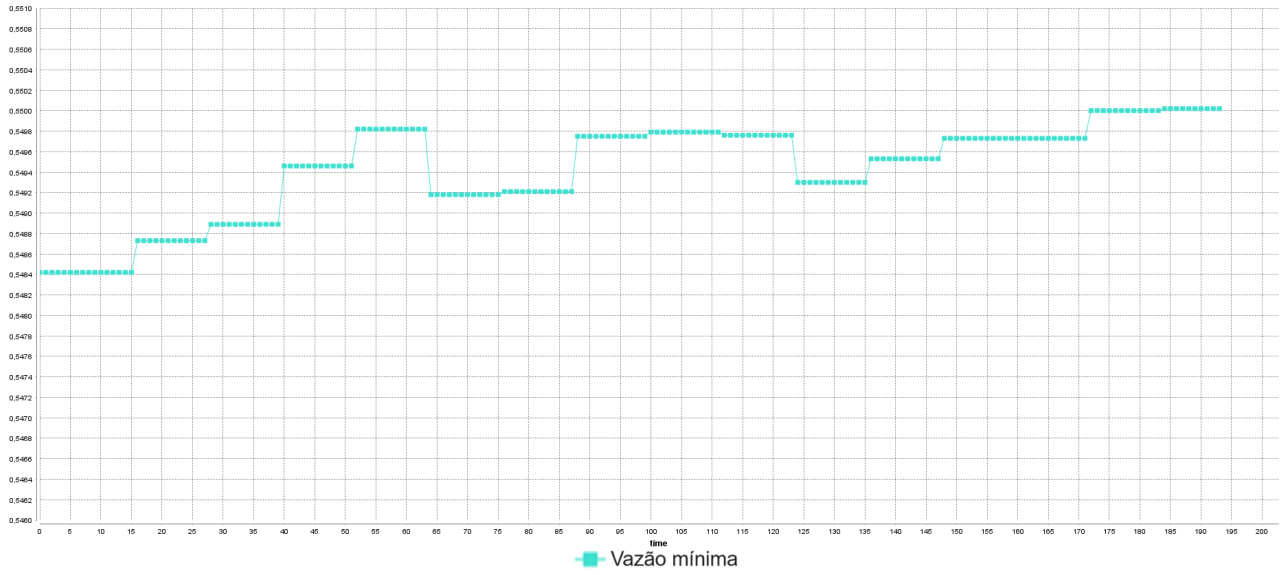


Figura 48: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

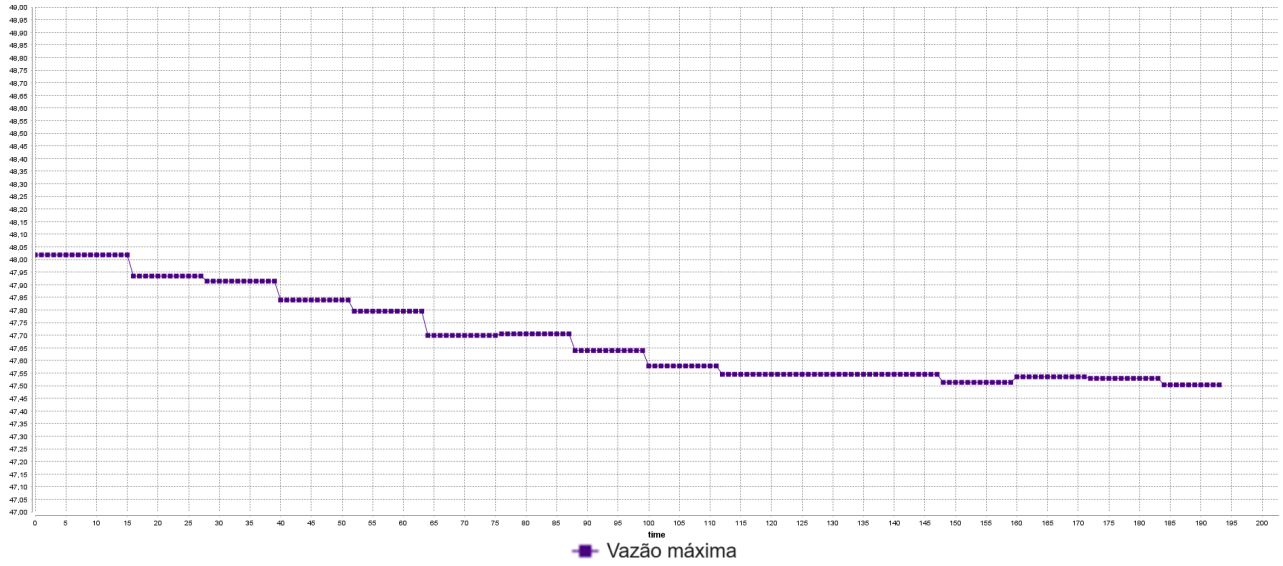


Figura 49: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

chegando a 47.13% da região, e mata nativa, ocupando 10.96% da região. Para esta simulação, as vazões mínimas e máximas permaneceram com o comportamento quase invariável, isto é, sua variação foi próxima do valor inicial. Dessa forma, não são apresentados os gráficos referentes a estas vazões. Uma interpretação para estes resultados pode estar relacionada com a rápida estabilidade na região de ocupação do uso do solo para silvicultura, e na compensação entre agricultura e pastagem.

A Figura 54 apresenta a mudança no uso do solo durante a simulação 7. Para esta simulação, obteve-se como principais mudanças no uso do solo a pastagem e a silvicultura, onde ocuparam cerca de 25.99% e 7.58% do ambiente, respectivamente. As regiões impactadas fo-

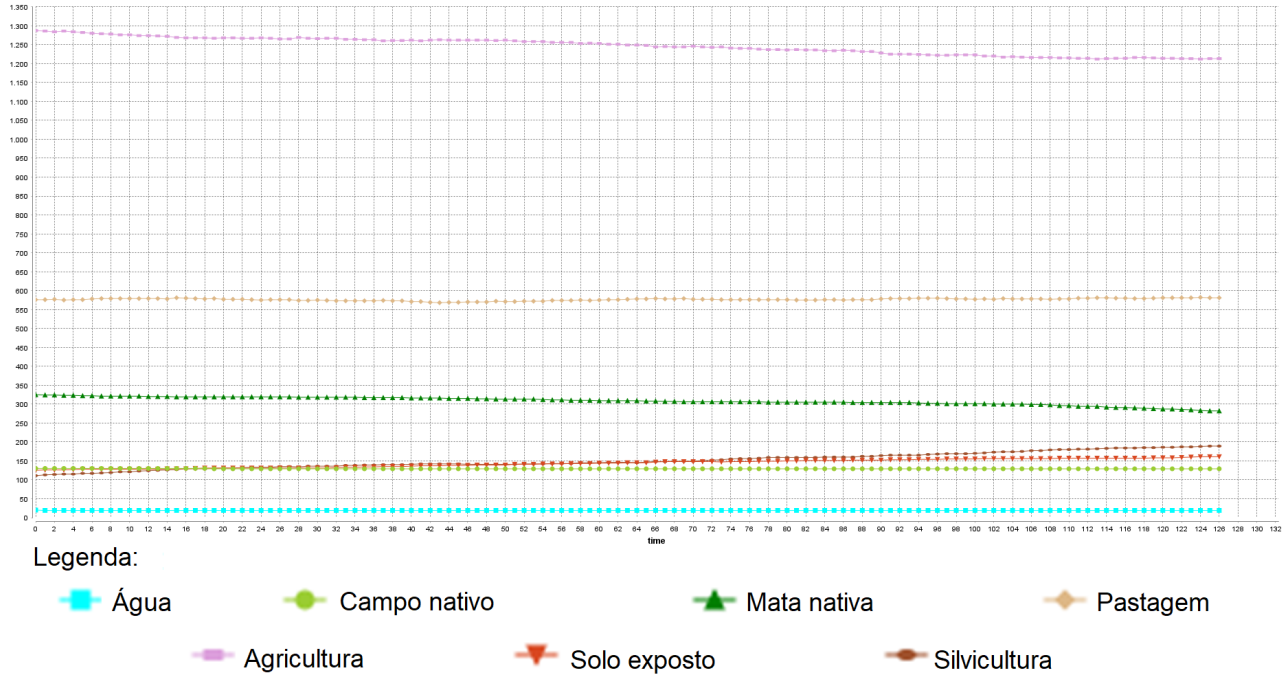


Figura 50: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

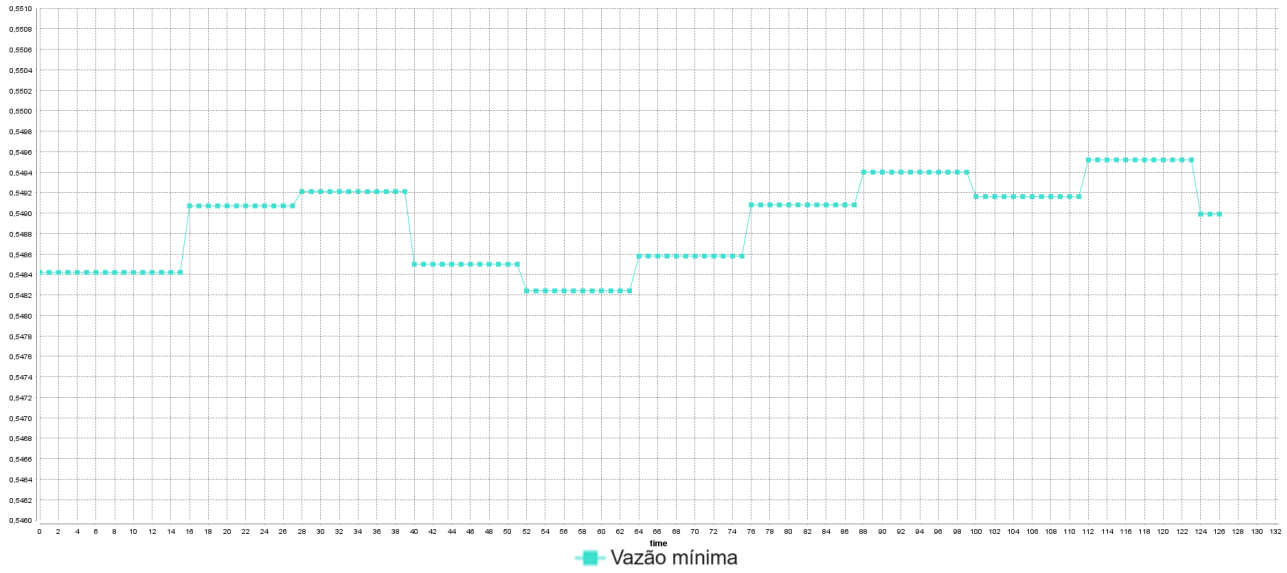


Figura 51: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

ram agricultura, ocupando 45.07%, e mata nativa, 10.88% da região. Como pode-se observar, a simulação 7 apresentou resultados simulares aos da simulação 6, e isso inclui os resultados das vazões mínimas e máximas. Dessa forma, pela mesma razão mencionada, os gráficos das vazões referentes a simulação 7 não serão apresentados.

As mudanças no uso do solo da simulação 8 são apresentadas na Figura 55. Nesta simulação, as maiores mudanças ocorreram para pastagem e silvicultura, onde atingiram regiões de ocupação de aproximadamente 24.32% e 6.37%, respectivamente. As áreas mais afetadas

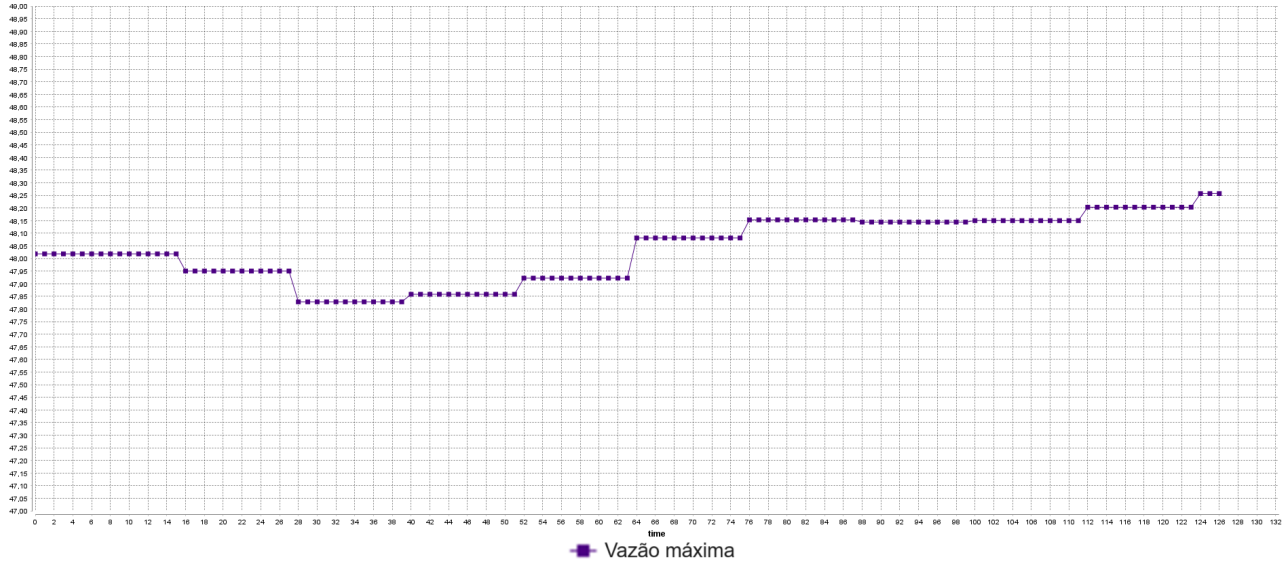


Figura 52: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

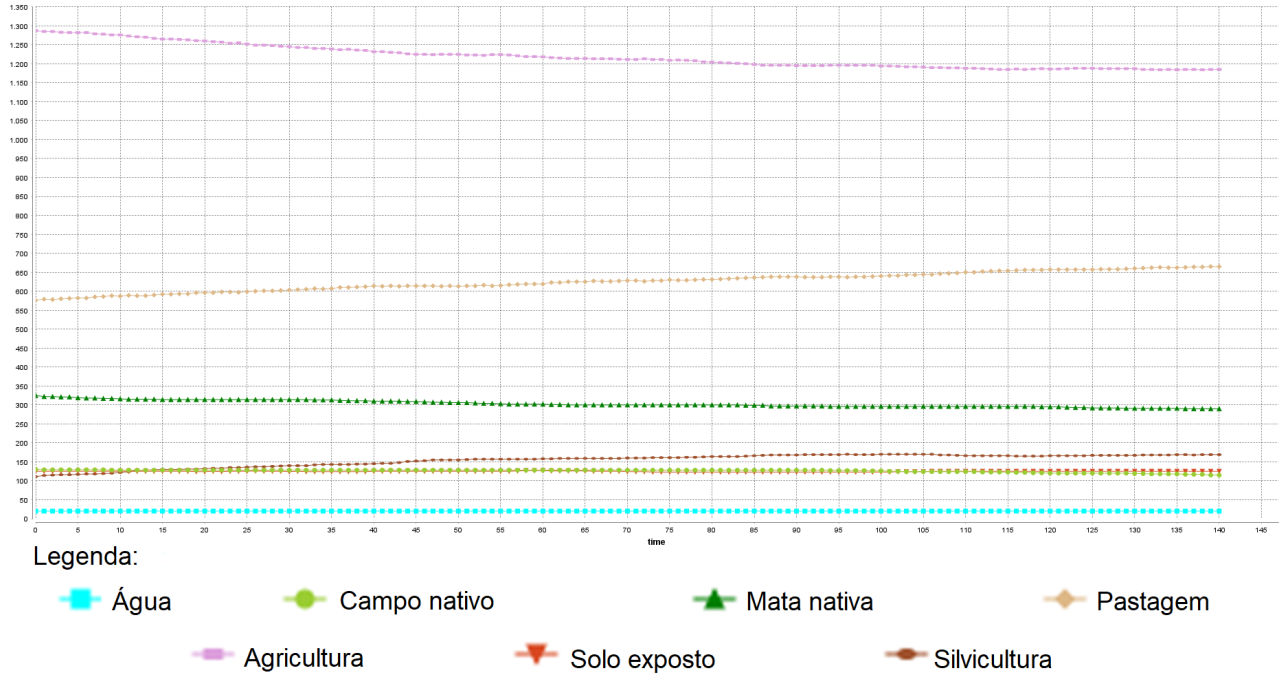


Figura 53: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

foram referentes aquelas ocupadas por mata nativa e agricultura, onde atingiram, nessa ordem, 11.5% e 48.45% do ambiente. Entretanto, pode-se observar que, neste caso, houve uma recuperação territorial com relação a agricultura, e a partir do ciclo 90, a mudança no uso do solo para pastagem teve um decrescimento. Além disso, pode-se observar que a partir do ciclo 100, o sistema apresentou poucas variações significativas. No geral, esta simulação apresentou mudanças suaves, gerando vazões mínimas e máximas quase invariáveis. Diante disso, os gráficos referente as vazões não serão apresentados.

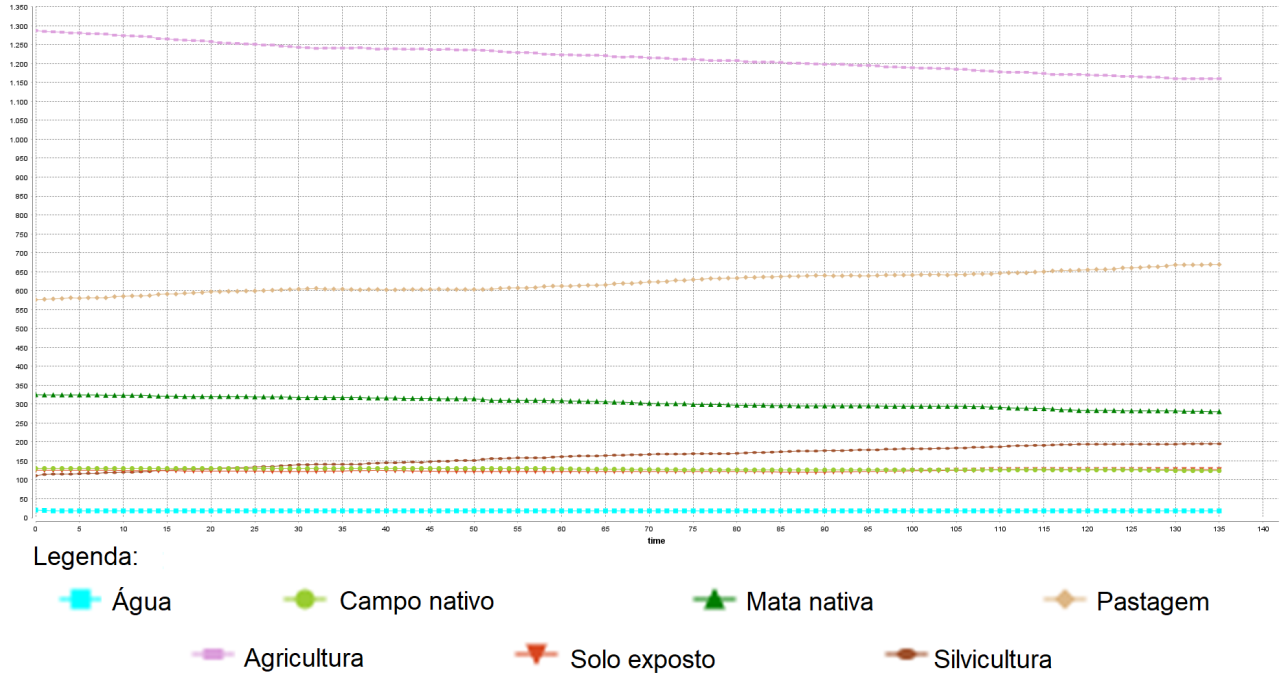


Figura 54: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

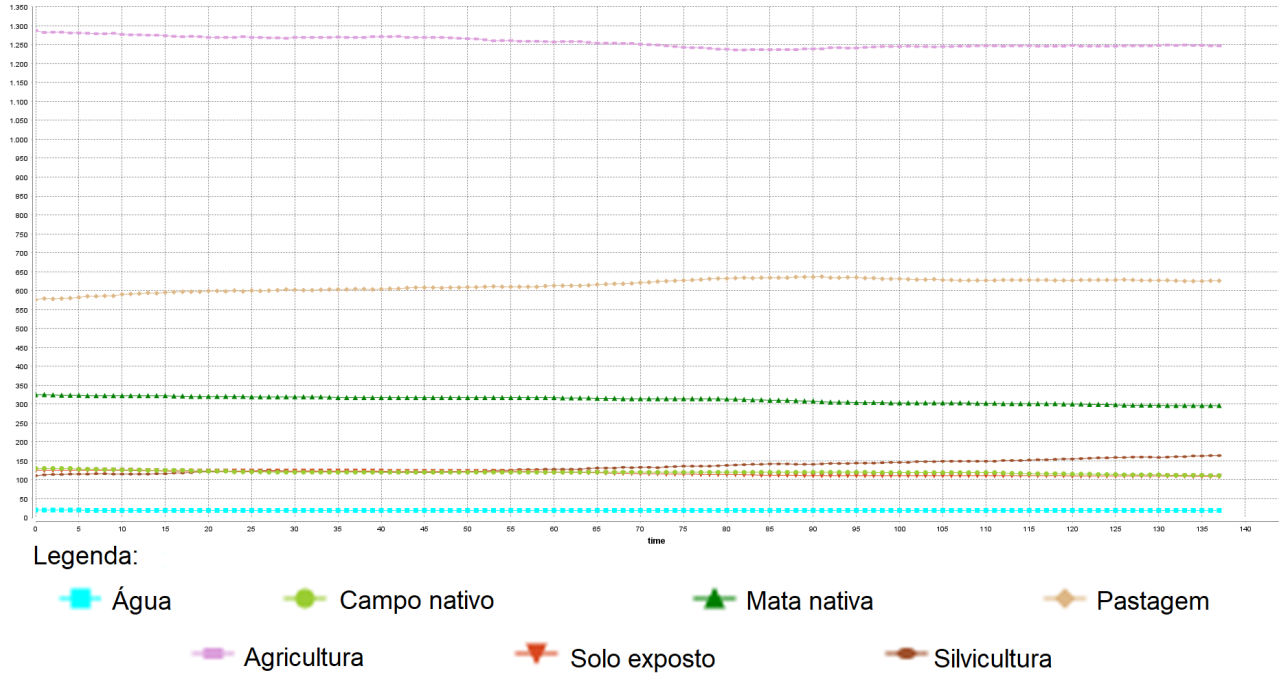


Figura 55: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

Na Figura 56, tem-se o comportamento da mudança no uso do solo, da simulação 9. As maiores mudanças ocorreram para pastagem, com área de ocupação de 22.38% para 25.60%, e silvicultura, de 4.31% para 6.37%. Os usos do solo mais prejudicados foram mata nativa e agricultura, ocupando ao final da simulação 11.07% e 46.89% da região, respectivamente.

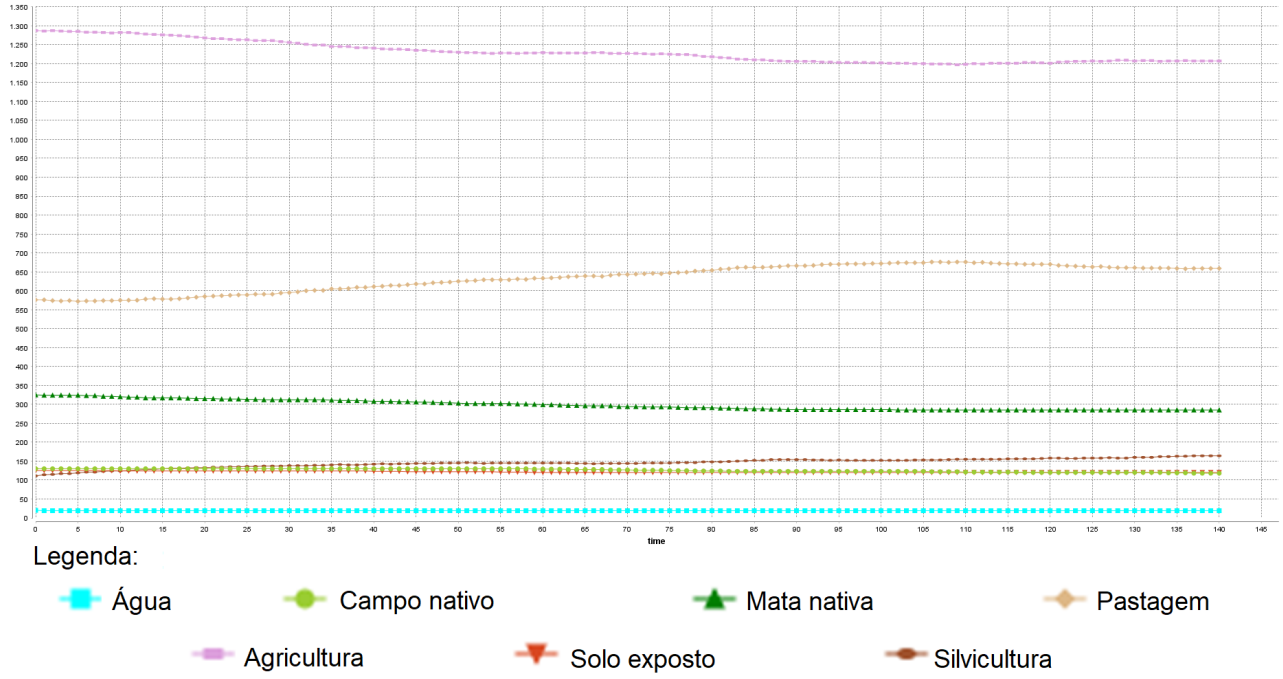


Figura 56: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

Nas Figuras 57 e 58 pode-se visualizar as variações das vazões mínimas e máximas. Pode-se observar que as variações mais significativas ocorrem para as vazões máximas, pois elas acompanham o comportamento da mudança no uso do solo. Por exemplo, no ciclo 110 a pastagem atingiu o índice mais alto de ocupação na região, a agricultura e a mata nativa os níveis mais baixos, e a silvicultura apresentava um comportamento quase invariável. Neste momento tem-se o valor mais alto da vazão máxima, reafirmando que quando há desmatamento na região, o acúmulo de água aumenta. Já, ao final da simulação, percebe-se que há um leve decrescimento de pastagem na região. Por outro lado, tem-se o crescimento de agricultura e silvicultura. E pode-se perceber que as vazões máximas tendem a diminuir nesse processo.

A Figura 59 mostra o comportamento do ambiente ao longo da simulação 10, onde tem-se o menor número de ciclos do cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo. Essa simulação foi a que apresentou maior mudança para solo exposto, onde esse uso do solo teve início de 4.86% e fim de 5.17% de ocupação no ambiente. Entretanto, as maiores mudanças ocorreram para silvicultura e pastagem, onde finalizaram a simulação com 6.64% e 26.85% do ambiente, respectivamente. As regiões mais impactadas foram agricultura, ocupando 44.68% do ambiente, e mata nativa, ocupando 10.92% do ambiente.

As vazões mínimas e máximas podem ser visualizadas nas Figuras 60 e 61. Nesta simulação, as vazões mínimas e máximas apresentaram uma pequena variação. As vazões máximas mostraram acompanhar os processos de mudança no uso do solo. Pode-se perceber que quando as regiões começam a mudar para silvicultura, solo exposto e pastagem, ao passo em que a agricultura e mata nativa diminuem, as vazões aumentam.

No que tange aos resultados apresentados sobre a mudança no uso do solo, e as respec-

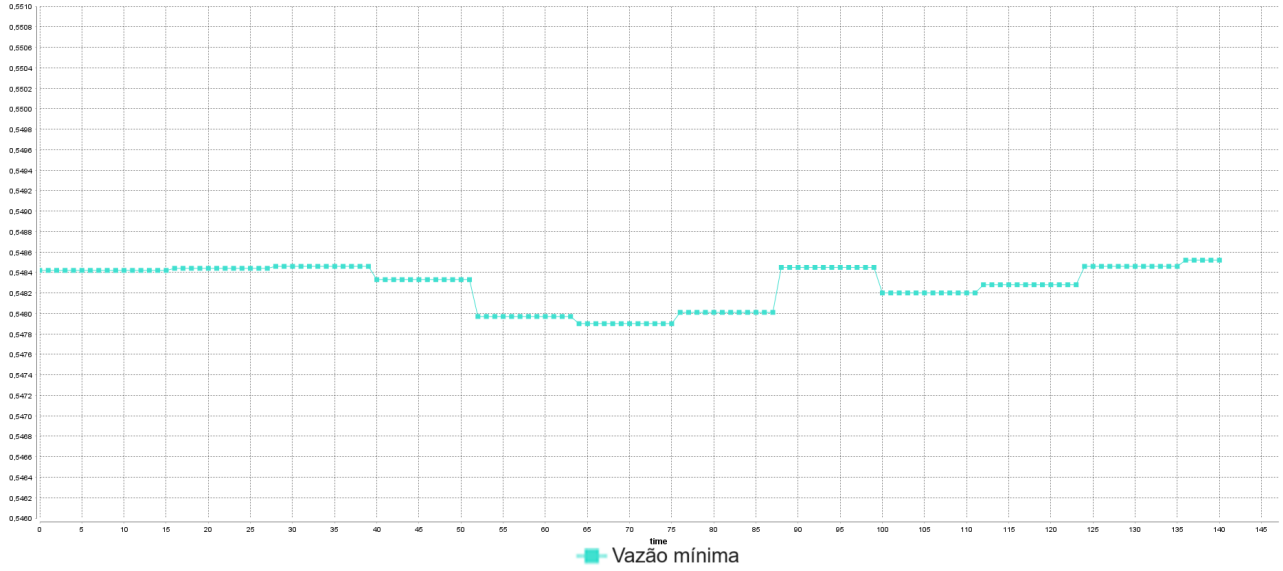


Figura 57: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

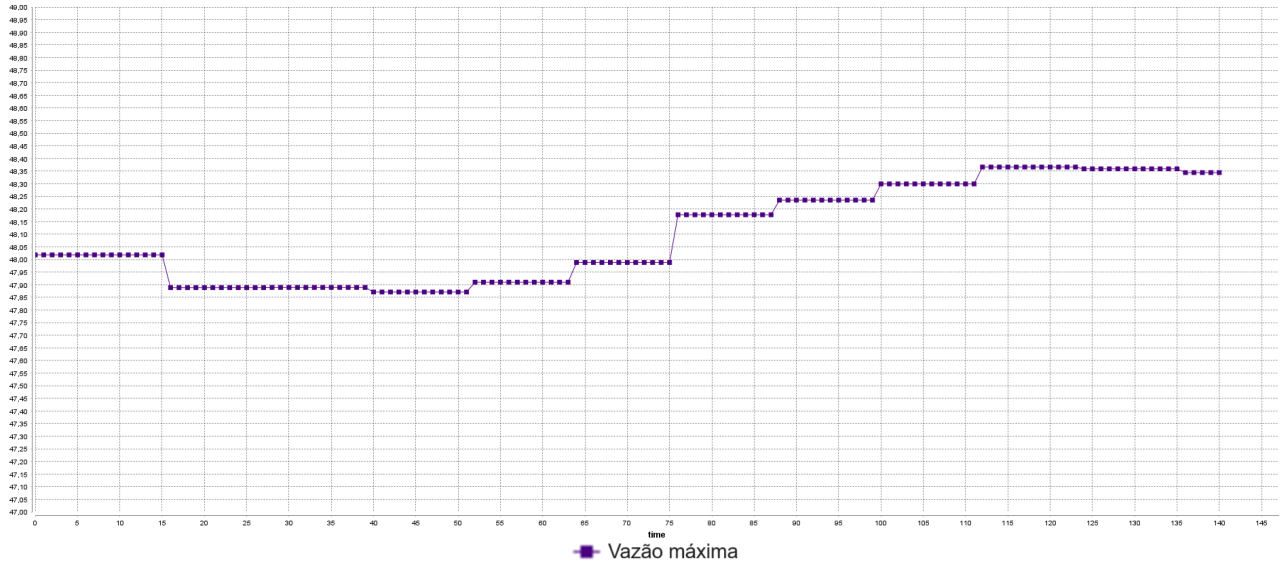


Figura 58: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

tivas vazões simuladas, ao se modificar 10% do ambiente, algumas análises gerais podem ser realizadas. Para esta situação, os usos do solo mais prejudicados foram agricultura e mata nativa. Entretanto, em muitos casos, a agricultura apresentou taxas de crescimento, gerando recuperação desse uso. Já as mudanças no uso do solo mais relevantes envolveram pastagem, silvicultura, e, em alguns casos, solo exposto.

Nas Figuras 62, 63 e 64 tem-se um comparativo entre as vazões mínimas e máximas anuais, no último ano simulado em cada uma das simulações apresentadas. Pode-se perceber que, mesmo com baixas variações no ambiente, algumas mudanças significativas nas vazões ocorreram. Nota-se que a simulação 5 gerou valores maiores para as vazões, principalmente

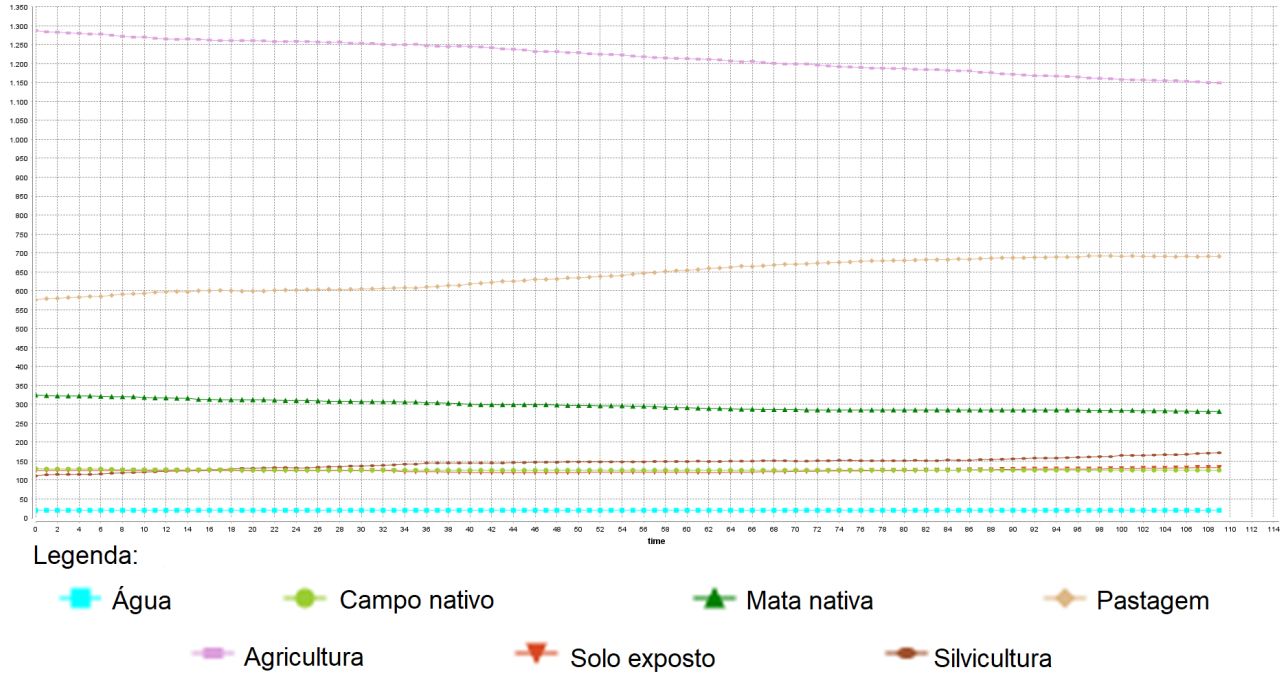


Figura 59: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 2, considerando 10% de mudança total do ambiente.

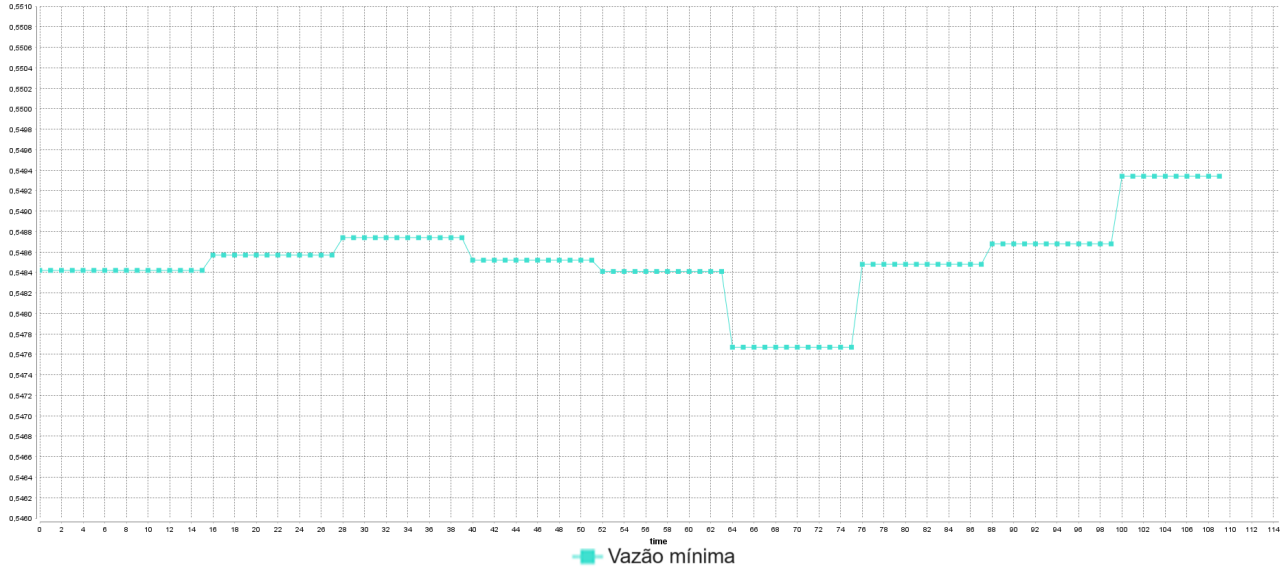


Figura 60: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

considerando as vazões mínimas e médias anuais. Além disso, mesmo considerando algumas restrições no SMA, o processo para atingir 10% de mudança no ambiente se mostrou relativamente rápido. Em algumas simulações, pôde-se perceber que quando a mudança ocorre de forma mais suave, ou quando há recuperação entre os usos do solo modificados, as vazões não sofrem modificações bruscas ou significativas.

Com relação a negociação entre os agentes, alguns resultados serão comentados. Primeiramente, tem-se a Tabela 26, onde pode-se comparar os valores referentes as tentativas de compras

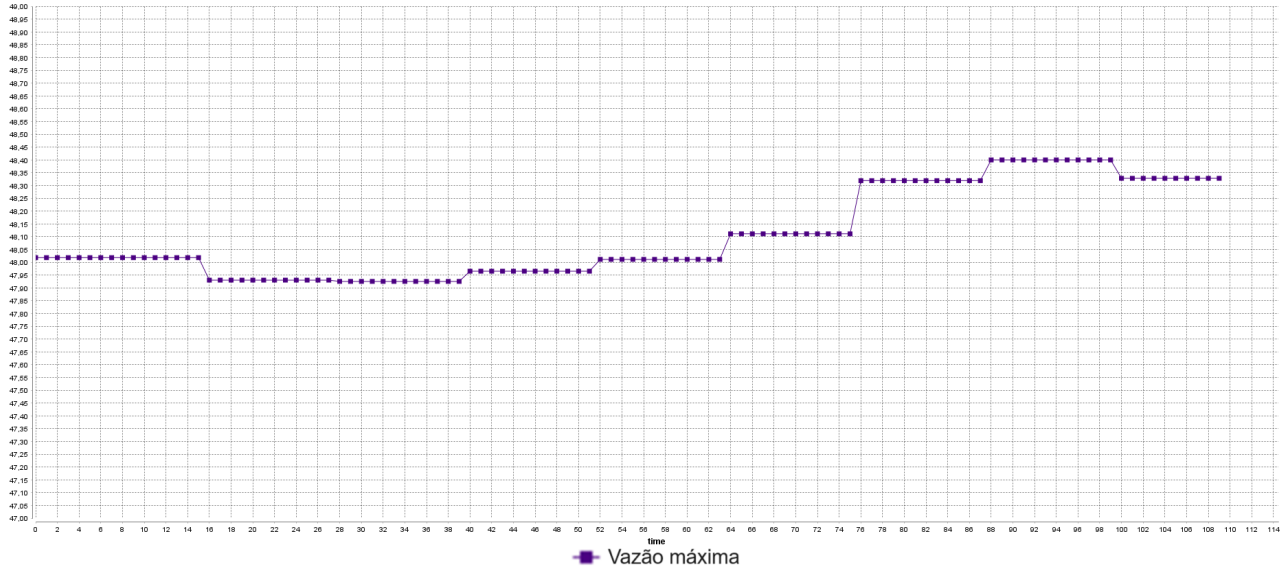


Figura 61: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 10% de mudança do uso do solo.

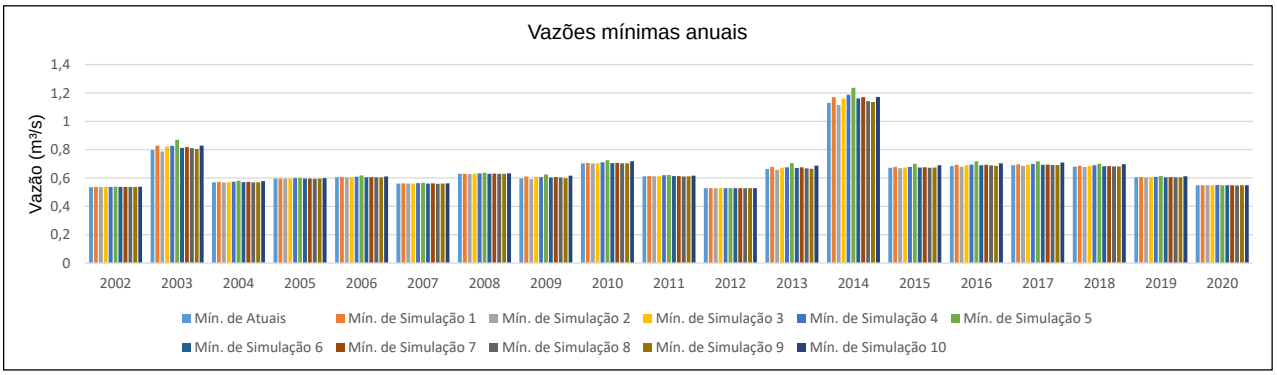


Figura 62: Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

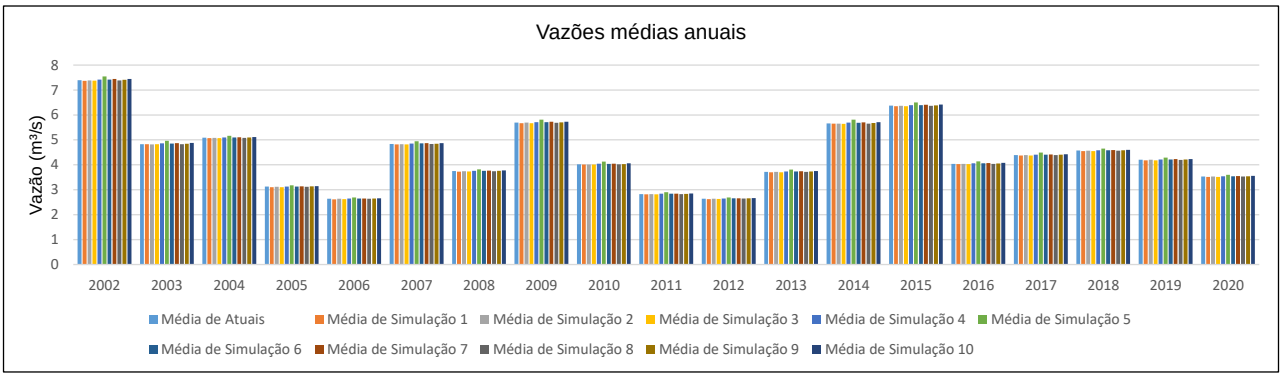


Figura 63: Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

de lotes ao longo das simulações do cenário 2, considerando 10% de mudança no ambiente.

Os gestores se movimentam na tentativa de modificar o uso do solo, e quando se deparam

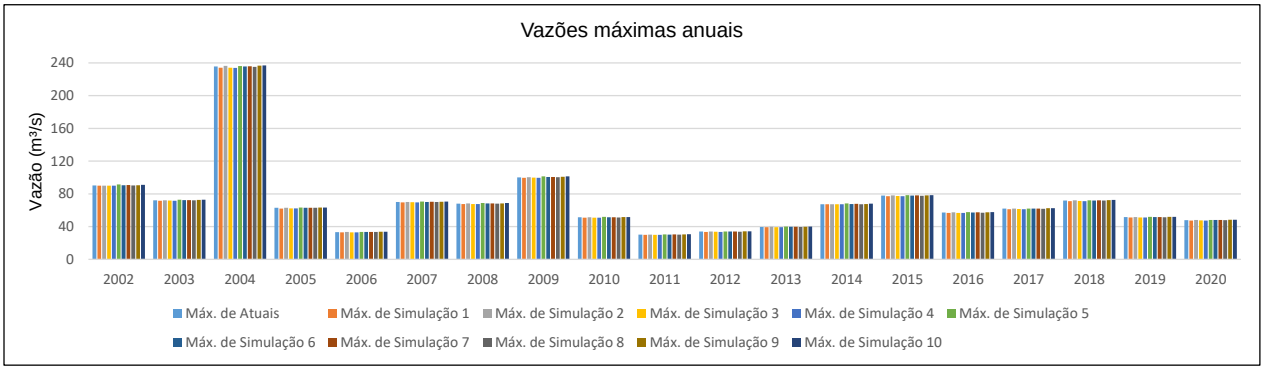


Figura 64: Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

com lotes que não os pertencem, tentam negociar. Os maiores números de tentativas ocorreram nas simulações 2 e 4, onde foram realizadas as simulações com mais ciclos. Assim como, as simulações 5 e 10, consideradas mais rápidas, resultaram em tentativas menores no número de compras de lotes.

Percebe-se que, na maioria das simulações, ocorreram mais rejeições do que conclusões nas tentativas de compras. Esses resultados estão diretamente relacionados as taxas de porcentagem de venda e aos valores de venda determinados em cada simulação.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Tentativas	916	1538	998	1440	473	678	821	635	919	484
Negadas	753	1372	834	1306	207	494	625	415	696	316
Concluídas	163	166	164	134	266	184	196	220	223	168

Tabela 26: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 2, com 10% de mudança do uso do solo no ambiente.

Quando o gestor inicia a simulação com um baixo número de lotes, e com regiões de baixa produção, seu saldo tende a ser baixo. Consequentemente, esse gestor terá mais dificuldade em concluir a compra de um lote com outro agente. Além disso, muitas vezes, por não conseguir negociar a compra de lotes com outro gestor, o agente acaba permanecendo com uma baixa produção e seu saldo decresce.

Já o gestor que começa a simulação com um número maior de lotes, possui uma produção maior, e seu saldo cresce de forma mais rápida. Isso faz com que consiga fazer negociações bem sucedidas com outros agentes. Além disso, como possuem mais regiões, acabam vendendo lotes próprios, gerando um lucro ainda maior.

Alguns exemplos disso podem ser visualizados nas Figuras 65 e 66. Percebe-se que os gestores Gestor0 e Gestor1 são os que negociam menos lotes com outros gestores, e também os que possuem um saldo menor. Entretanto, na simulação 4 esse comportamento muda parcialmente, pois o Gestor1 compra aproximadamente 45 lotes, porém o saldo nessa simulação ainda é baixo. Pode-se notar também que o Gestor14 é o agente que possui maior número de lotes no início da simulação. Por esse motivo, é o gestor que produz mais, e que possui maior saldo.

Pode-se visualizar que ocorreram crescimentos lineares para os saldos dos agentes, durante os ciclos, em cada simulação. O maior saldo atingido ocorreu na simulação 2, pelo Gestor0. Já o menor saldo foi atingido pelo Gestor0, na simulação 10.

O cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo apresentou bons resultados. O modelo acoplado sócio-hidrológico mostrou gerar resultados impactantes em cenários de poucas mudanças, e com períodos razoavelmente curtos. Nas Figuras 36 e 37, percebe-se que as modificações geradas foram realizadas de forma espaçadas, e as sub-bacias variaram ao longo das simulações. As vazões obtidas no modelo LASH corresponderam às mudanças geradas no SMA. Além disso, pode-se analisar alguns processos de negociação entre os agentes do SMA. Nas próximas seções serão explorados o tempo, o impacto e a negociação entre os gestores, em novos casos de mudanças no uso do solo.

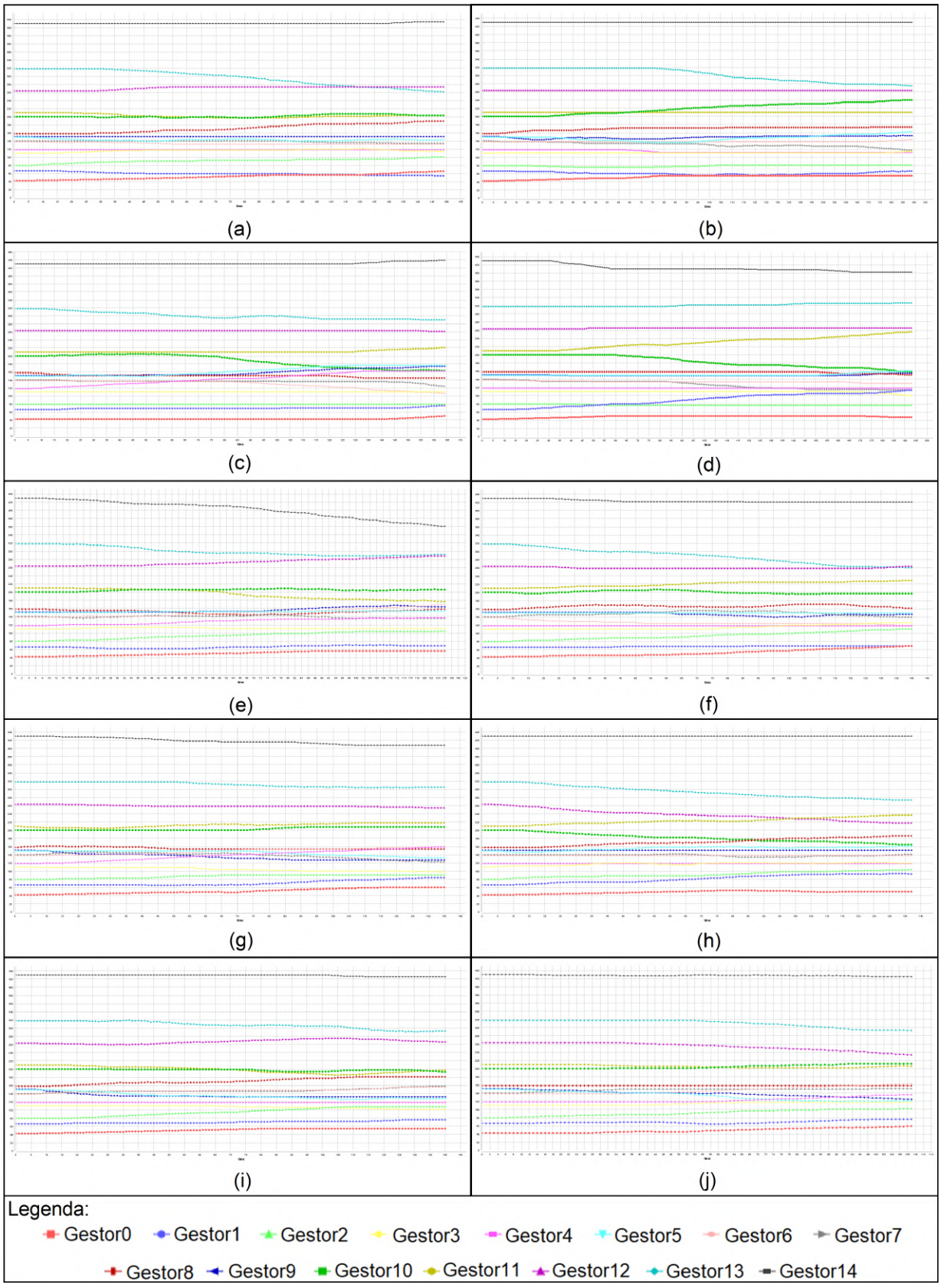


Figura 65: Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

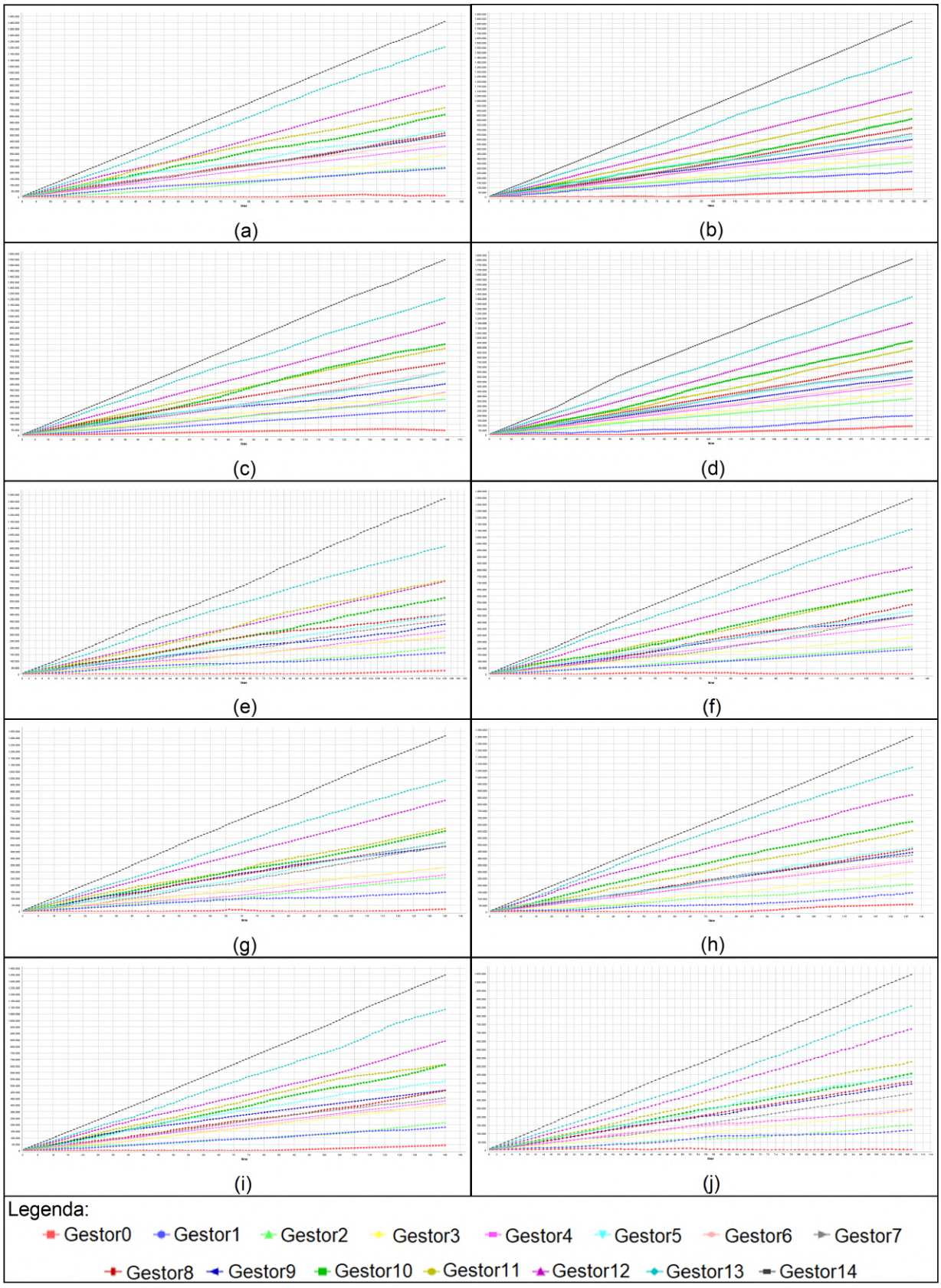


Figura 66: Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 10% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

Cenário 2 - Situação 2

As Figuras 67 e 68 apresentam os ambientes gerados ao final das simulações no SMA, após a mudança de 20% do uso do solo ser atingida. E na Tabela 27, tem-se a quantidade de ciclos em cada simulação.

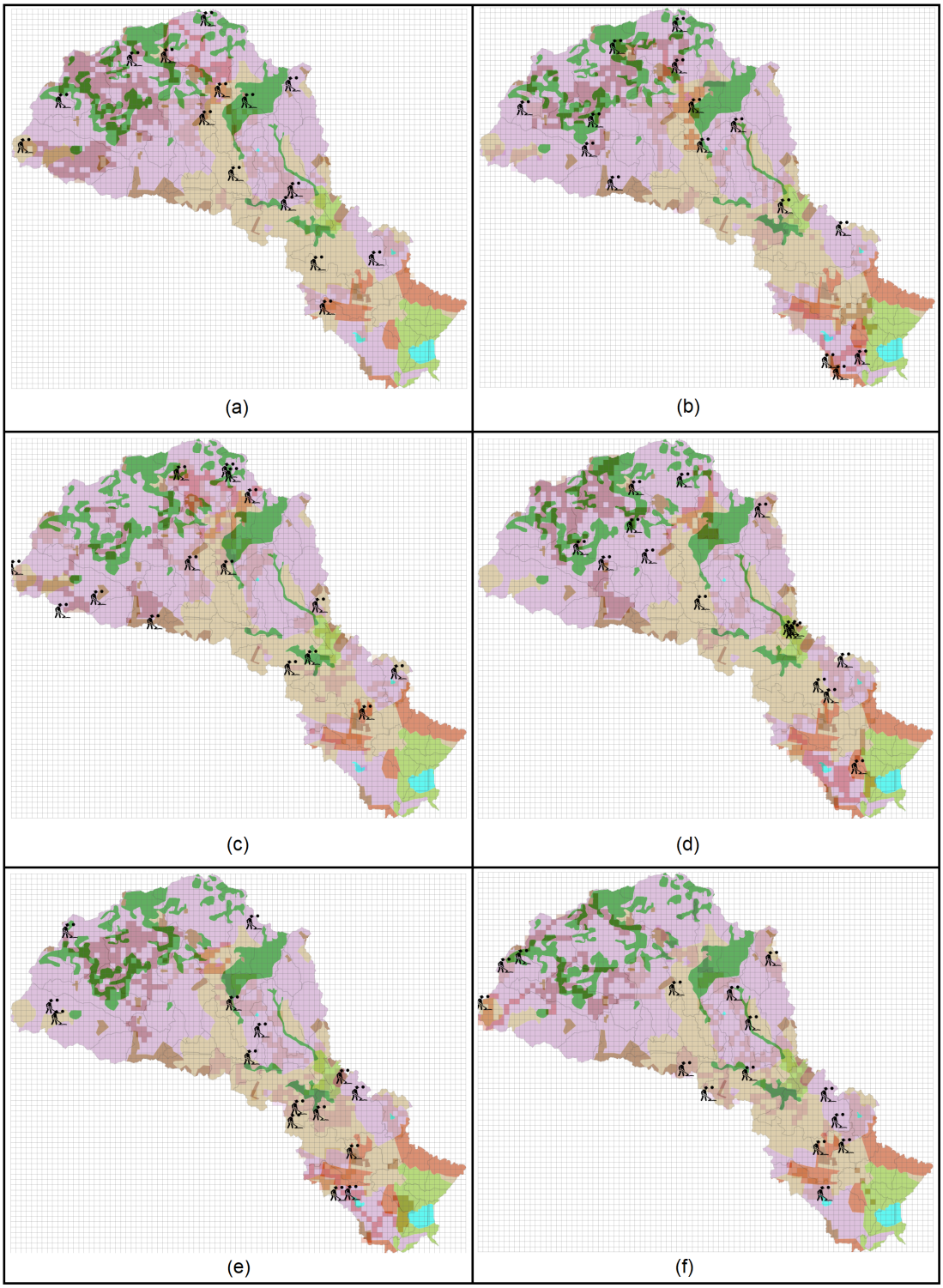


Figura 67: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6.

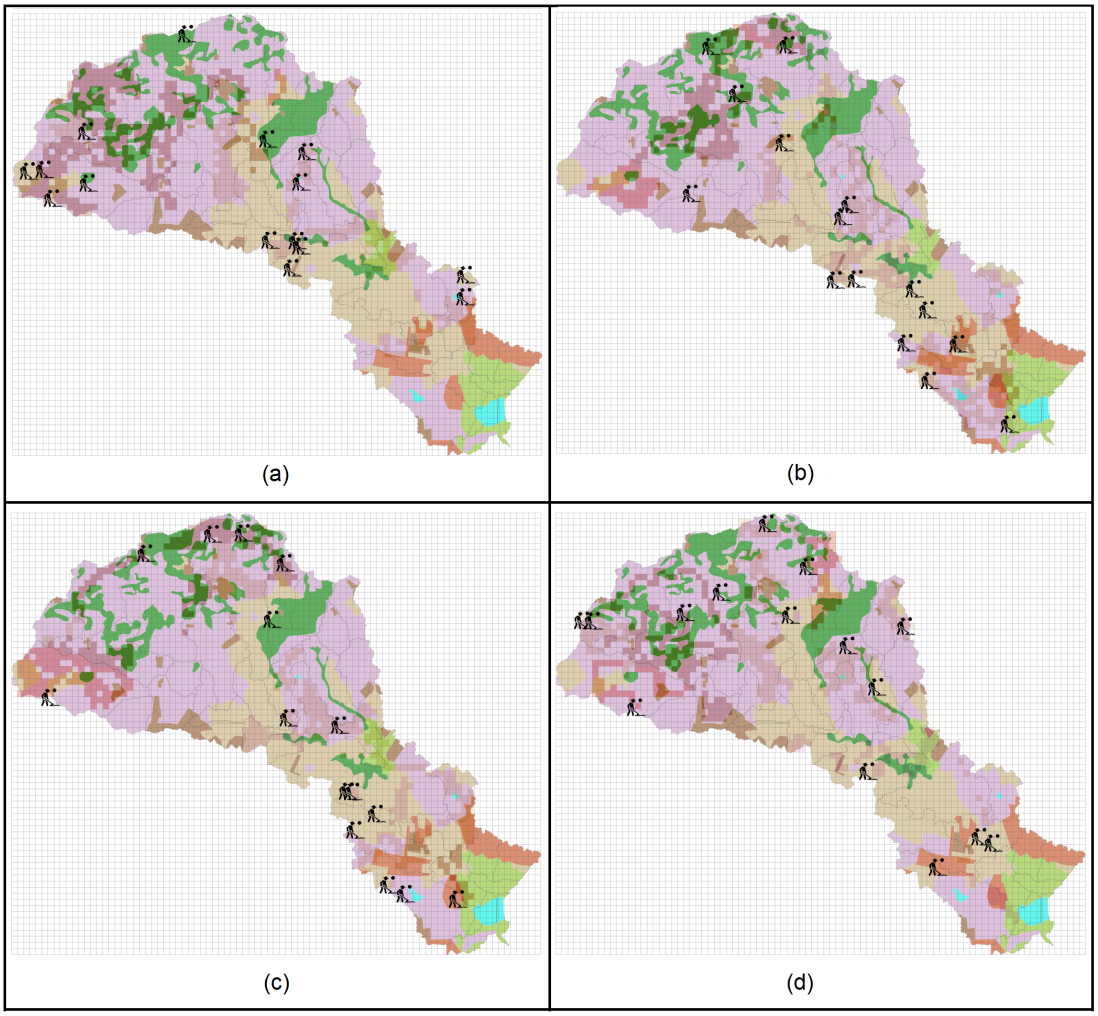


Figura 68: Ambientes finais do SMA, no cenário 2, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Ciclos	420	335	313	478	448	393	590	370	369	336
Anos	35	27,9	26,1	39,8	37,3	32,8	49,2	30,8	30,6	28

Tabela 27: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

O cenário 2, com 20% de mudança total no ambiente, apresenta maiores períodos de tempo, se comparados com a situação anterior. Além disso, observa-se que a mudança nesta situação ocorre de forma mais lenta, principalmente ao final das simulações. Um motivo para que isso ocorra é a necessidade dos agentes buscarem por regiões de mudança no uso do solo, das quais devem se enquadrar nas tendências, como determinado para o cenário 2.

Além do aumento nos períodos de simulação, pode-se observar que foram realizadas grandes mudanças no ambiente da BHAF. Em cada simulação, percebe-se que foram realizadas modificações concentradas em grandes regiões do ambiente, o que difere visualmente da situação anterior. Além disso, na Tabela 28, pode-se observar que os valores obtidos para as mudanças totais em cada uso do solo, para cada simulação, teve uma variação maior.

No geral, as simulações 5 e 7 foram as que apresentaram maiores períodos de tempo, com respectivamente, 448 e 590 ciclos (37,3 e 49,2 anos). Já as simulações 2 e 3 foram as que obtiveram menores períodos de tempo, com 335 e 313 ciclos (27,9 e 26,1 anos). As mudanças no uso do solo que mais ocorreram foram pastagem, solo exposto e silvicultura. E os usos do solo com maior prejuízo foram agricultura e mata nativa, como na situação anterior.

Uso do solo	I	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Água	20	17	17	18	18	18	18	20	17	19	20
Campo Nativo	130	121	115	118	106	94	109	110	117	109	115
Mata Nativa	325	227	238	255	236	228	224	250	237	251	241
Pastagem	576	718	593	729	741	595	689	731	654	721	754
Agricultura	1287	962	1160	1057	988	1158	1165	968	1109	1035	1009
Solo Exposto	125	161	178	161	209	174	140	113	144	186	198
Silvicultura	111	359	265	210	276	273	226	382	260	246	235

Tabela 28: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Na Figura 69 tem-se a mudança no uso do solo a cada ciclo, referente a primeira simulação do cenário 2, considerando a mudança de 20% do ambiente. Observa-se uma mudança crescente para pastagem e silvicultura, onde a primeira passou de 22.38% para 27.89% do ambiente e a segunda de 4.31% para 13.95% de ocupação da região. Além disso, houve uma mudança relevante de solo exposto, que passou de 4.86% para 6.25% da região. Nesta simulação, percebe-se o decrescimento de mata nativa e agricultura, das quais ocupavam 12.63% e 50% e passaram a ocupar 8.82% e 37.37%, respectivamente.

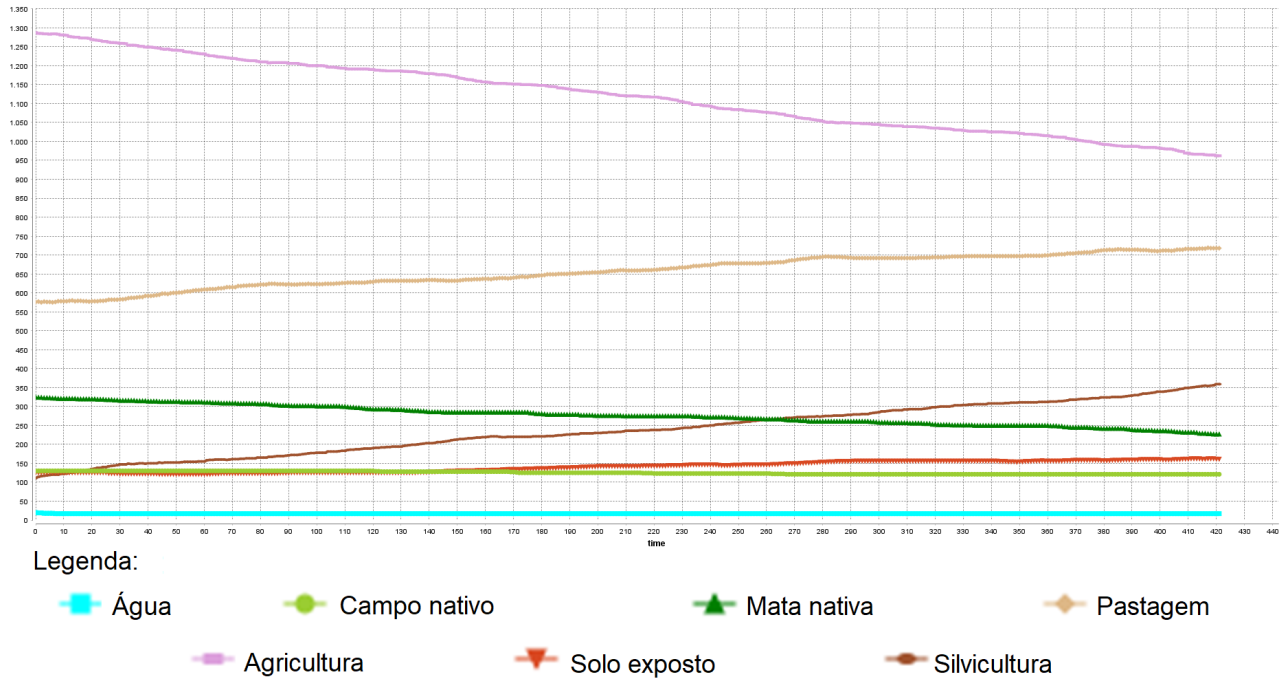


Figura 69: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

Nas Figuras 70 e 71 tem-se os comportamentos das vazões mínimas e máximas, para a simulação 1. Neste caso, ao longo das mudanças no uso do solo, há uma tendência de crescimento das vazões mínimas, enquanto que as vazões máximas decrescem. Os comportamentos das vazões máximas representa, principalmente, o contexto de reflorestamento apresentado. Nesse sentido, as vazões descrevem a mudança do ambiente do SMA.

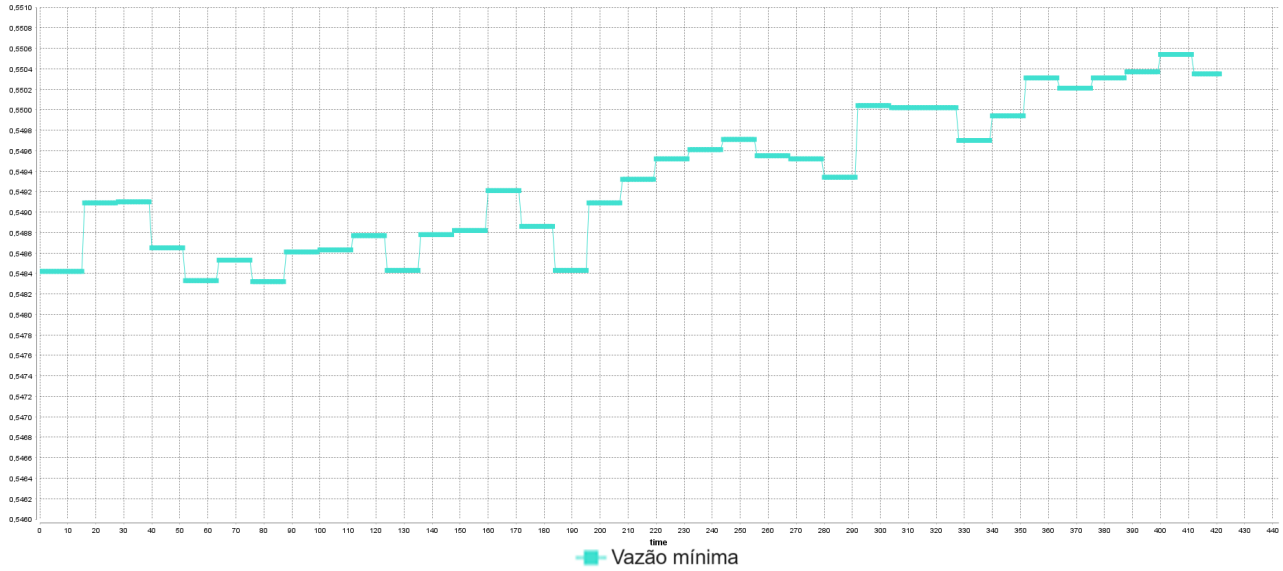


Figura 70: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

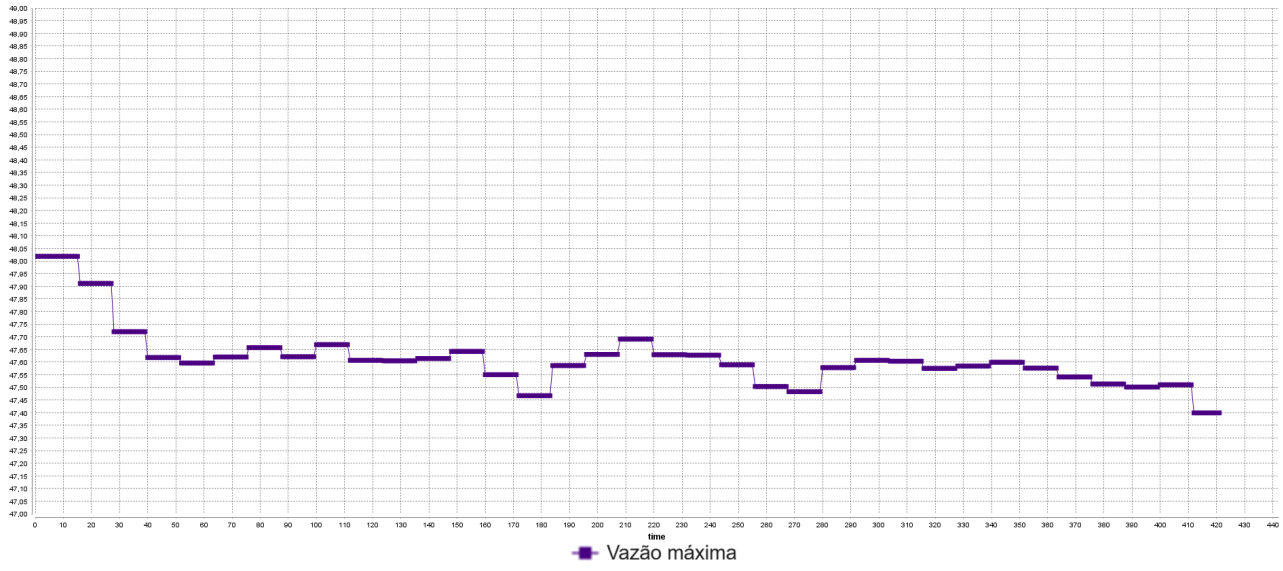


Figura 71: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

A Figura 70 mostra os resultados quanto as mudanças no uso do solo da simulação 2. Neste caso, as maiores mudanças ocorreram para solo exposto e silvicultura. Solo exposto iniciou a simulação ocupando 4.86% do ambiente, e finalizou com 6.92% da região. Já a silvicultura

iniciou com 4.31% e finalizou com 10.31%. Os usos do solo com maior impacto foram mata nativa e agricultura, que passaram a ocupar 9.25% e 45.07% do ambiente, respectivamente.

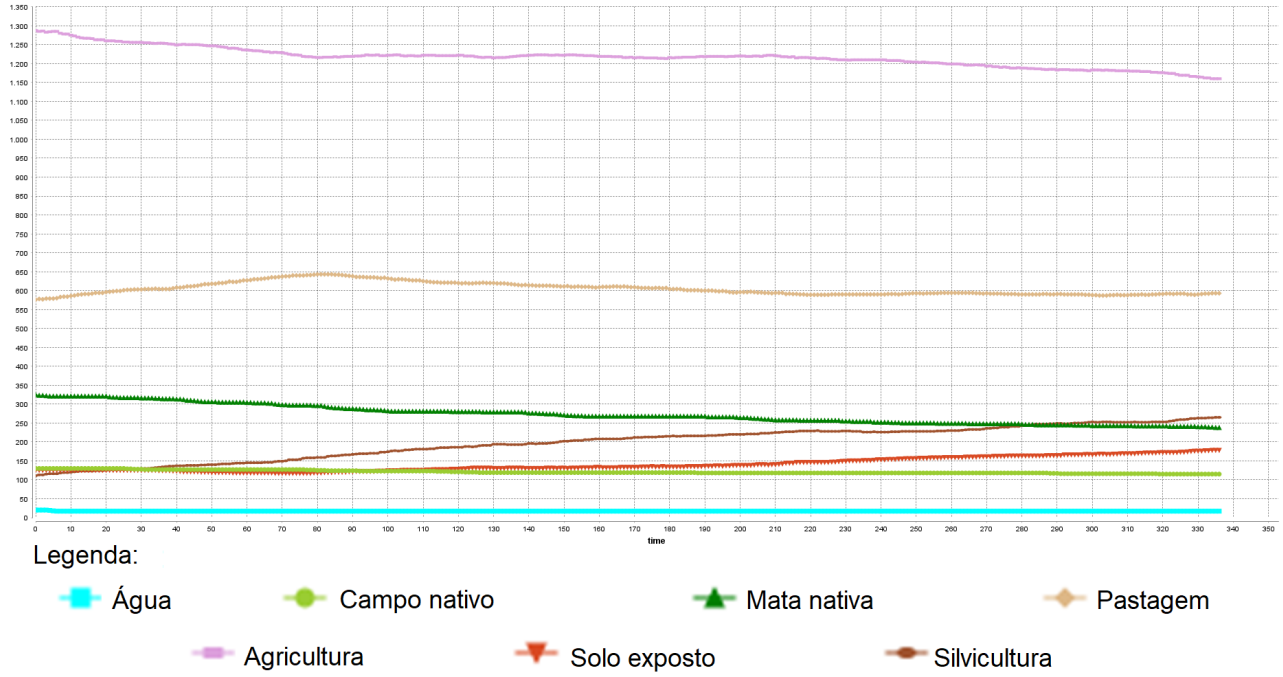


Figura 72: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

As Figuras 73 e 74 apresentam os gráficos referentes as vazões mínimas e máximas da simulação 2, respectivamente. Em ambos os casos, percebe-se um aumento considerável ao longo dos ciclos. Nesta simulação o aumento nas vazões pode estar associada a modificação do ambiente para solo exposto, fazendo com que as vazões acompanhem o comportamento da mudança no SMA. Além disso, existem alguns picos de mínimos e máximos que descrevem o comportamento das mudanças no uso do solo ocorridas no SMA. Por exemplo, no ciclo 80, a agricultura passa por um processo de baixa recuperação, enquanto a pastagem decresce lentamente. Nos ciclos seguintes, percebe-se uma queda nas vazões mínimas e máximas. Isso ocorre ao longo de toda a simulação.

A mudança no uso do solo da simulação 3 pode ser visualizada na Figura 75. A partir do gráfico, nota-se que as maiores mudanças ocorridas foram para pastagem e silvicultura. De fato, a primeira finalizou a simulação ocupando cerca de 28.32% do ambiente. Já a silvicultura ocupou 8.16%. Cabe salientar que solo exposto teve uma parcela de mudança significativa, onde o mesmo finalizou a simulação com 6.25% da região. As regiões envolvendo agricultura e mata nativa foram as maiores impactadas, chegando em 41.06% e 9.91% do ambiente.

As Figuras 76 e 77 apresentam os comportamentos das vazões mínimas e máximas, de acordo com a simulação 3. Nesta simulação as vazões também tiveram um comportamento crescente. Entretanto, alguns dos fatores para que isso ocorra podem estar associados aos altos índices de mudança para pastagem, e também a perda nas regiões de agricultura e, principalmente, de mata nativa.

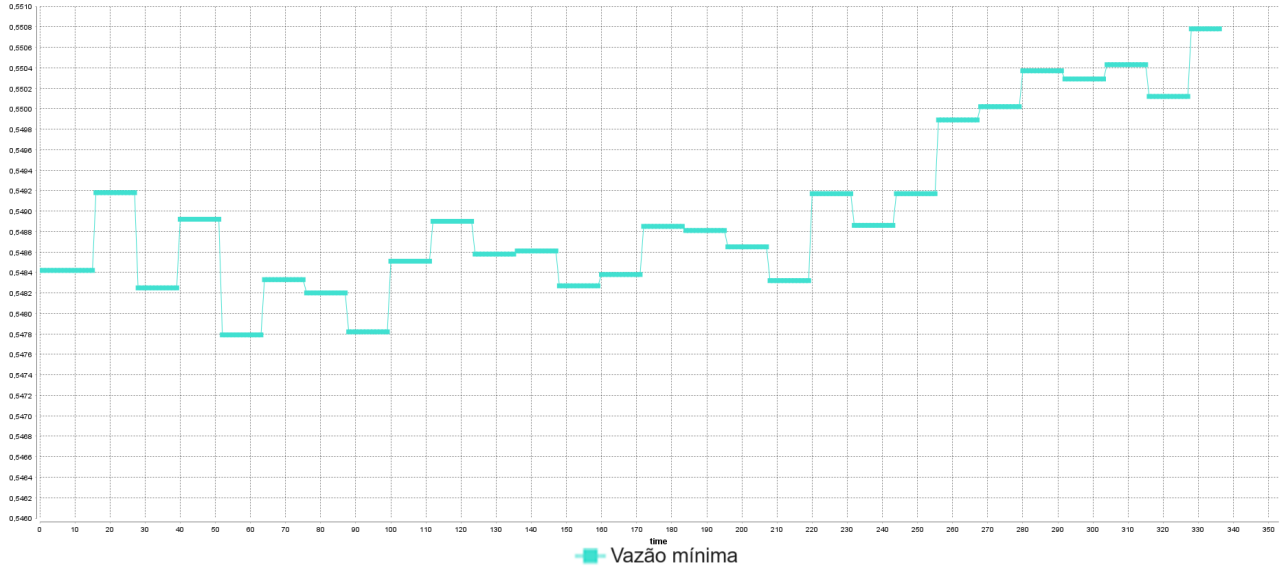


Figura 73: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

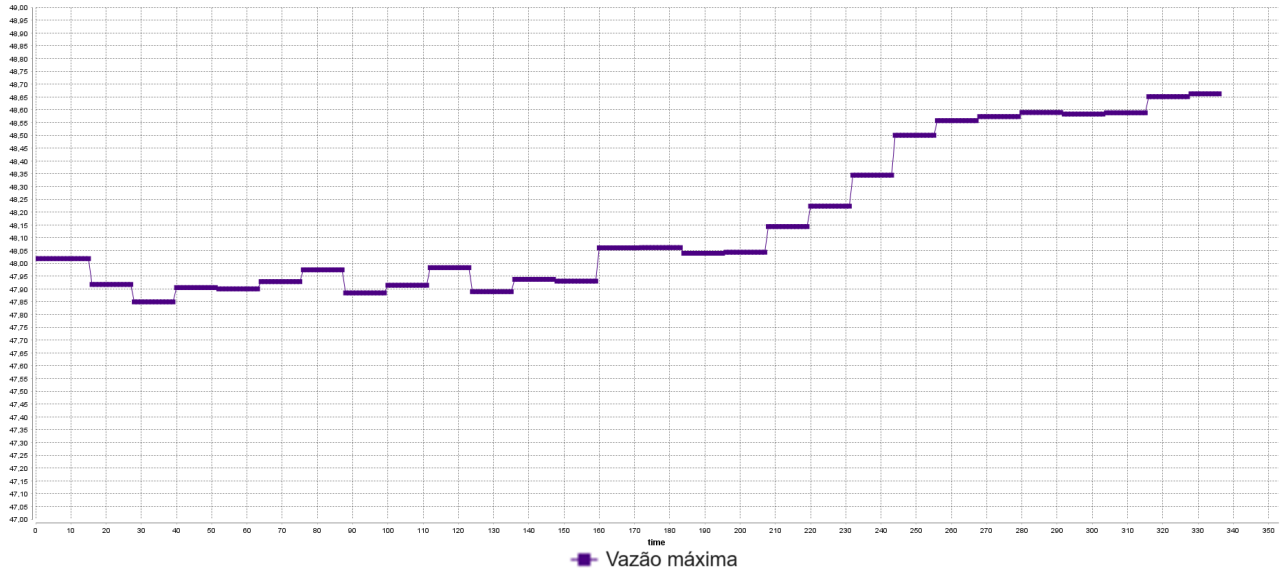


Figura 74: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

A mudança no uso do solo para a simulação 4, pode ser visualizada na Figura 78. Para este caso, as maiores modificações foram para pastagem, silvicultura e solo exposto, onde atingiram, respectivamente, 28.79%, 10.72% e 8.12% de ocupação no ambiente. Esta simulação foi a que gerou a maior mudança para solo exposto, dentre as 10 simulações do cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo. Pode-se observar que a quantidade de células referente a solo exposto quase ultrapassa aquelas voltadas a mata nativa. As regiões mais prejudicadas envolveram mata nativa e agricultura, onde chegaram em 9.17% e 38.38% da região, nessa ordem.

Na simulação 4, as vazões mínimas e máximas crescem de forma mais rápida, como pode-se visualizar nas Figuras 79 e 80. As mudanças no uso do solo para pastagem e solo exposto

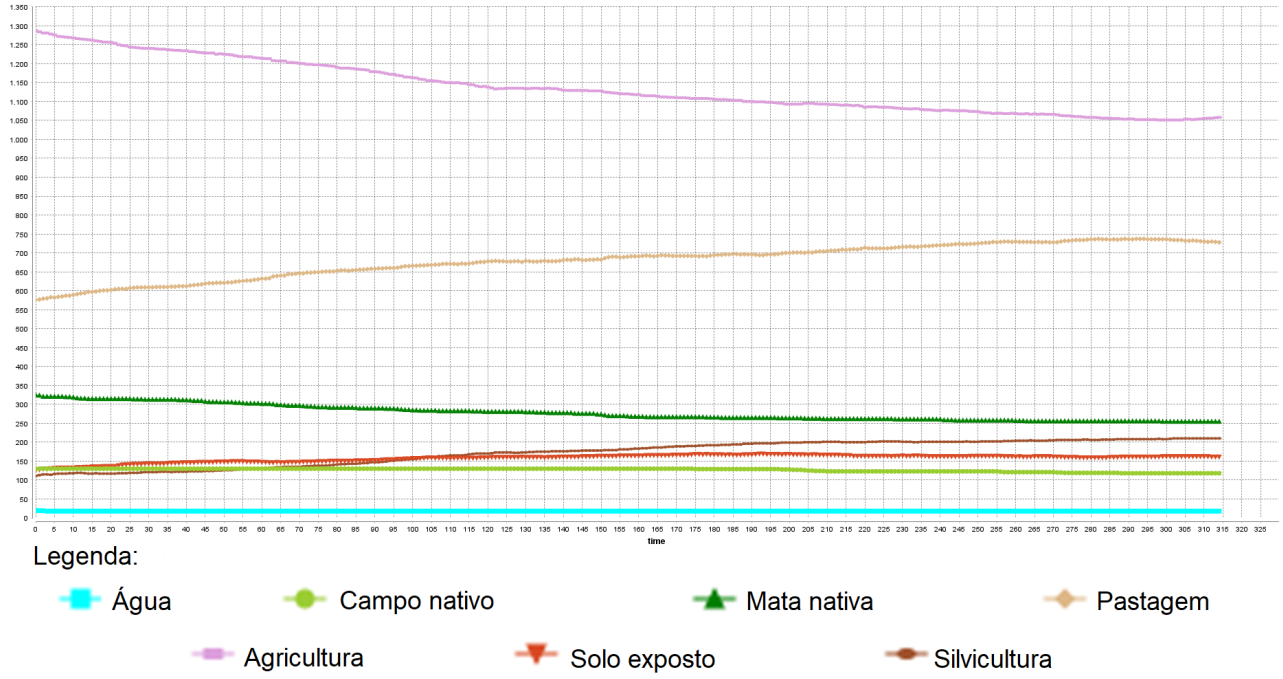


Figura 75: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

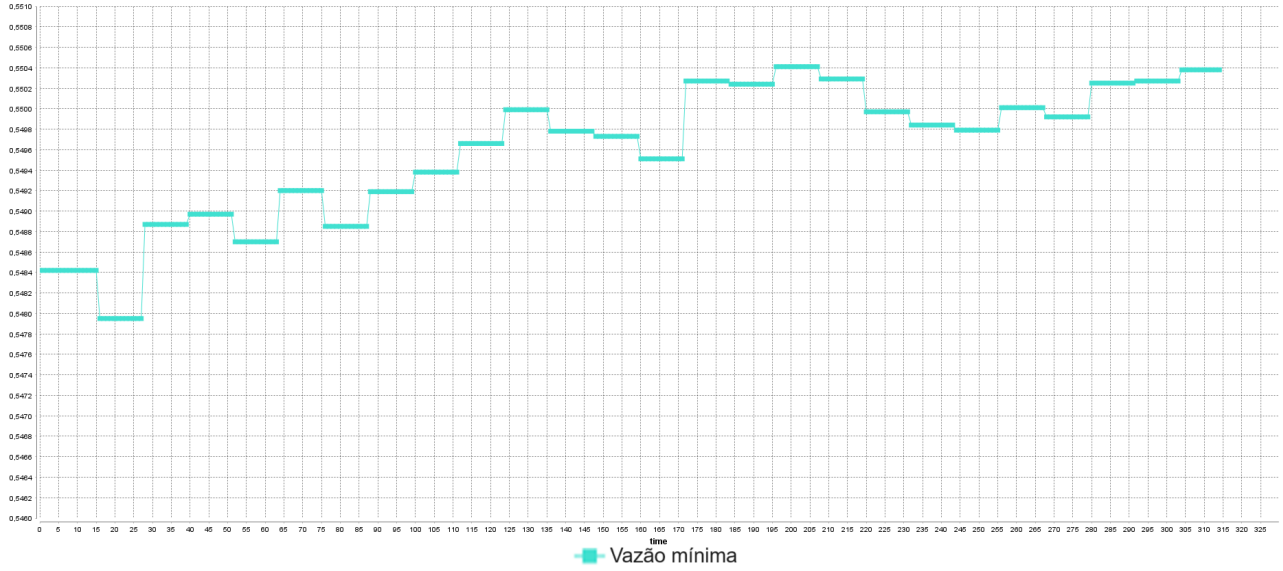


Figura 76: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

podem ser os fatores mais importantes de influência neste caso, ao passo em que se tem o decrescimento de agricultura e mata nativa. Esses resultados estão diretamente relacionados ao que foi comentado na Seção 4.2.1, onde cenários de desmatamento mostram ser aqueles que apresentam maiores valores para as vazões. Neste caso, os impactos podem trazer graves consequências ao ambiente, como casos de enchentes e inundações.

O gráfico da Figura 81 apresenta a mudança no uso do solo durante a simulação 5. Percebe-se que as modificações maiores foram para solo exposto e silvicultura. O primeiro uso do

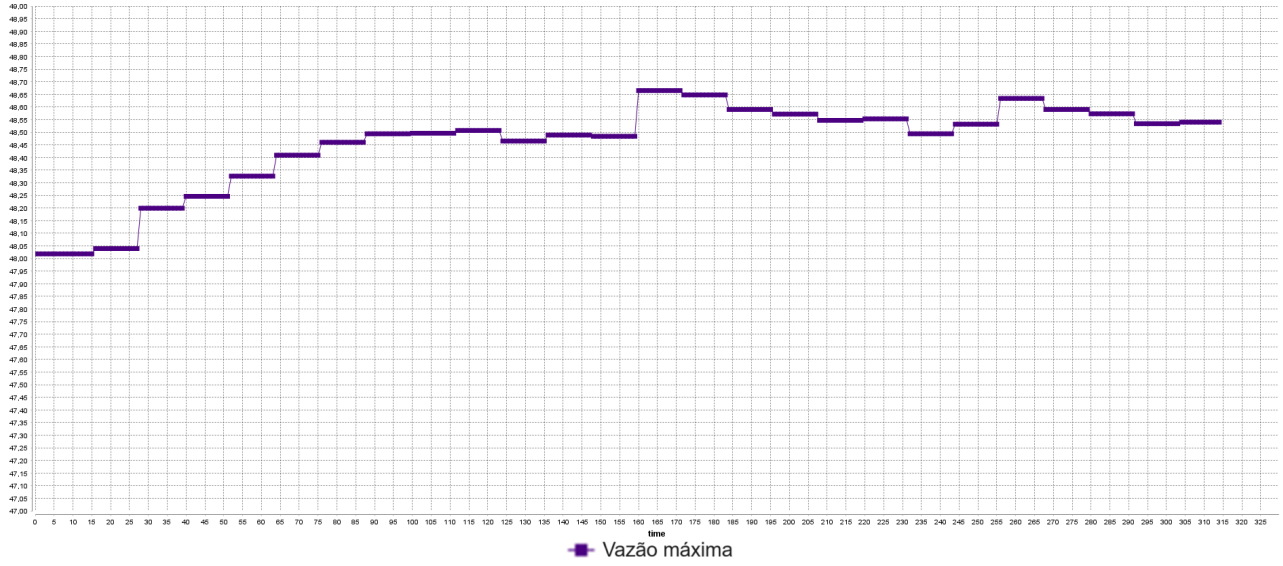


Figura 77: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

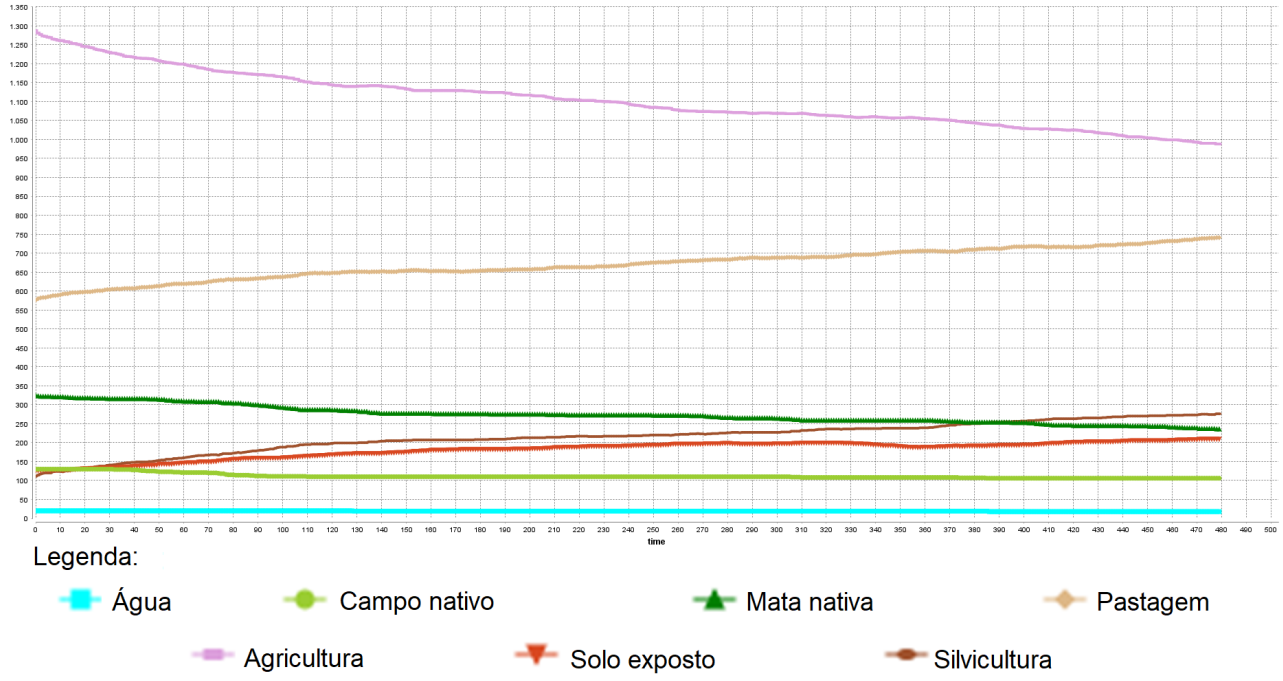


Figura 78: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

solo ocupava, antes da simulação, cerca de 4.31%, e, ao final da simulação, chegou a 10.61% da região. Já o segundo uso do solo ocupava 4.86% e finalizou com 6.76% do ambiente. Os maiores prejuízos ocorreram para agricultura e mata nativa, onde ficaram com 44.99% e 8.86% de ocupação da região, respectivamente.

Nas Figuras 82 e 83 tem-se as representações das vazões mínimas e máximas da simulação 5, respectivamente. Pode-se visualizar que há crescimento nas vazões, assim como nas simulações 3 e 4. Entretanto, neste caso, o crescimento mais importante ocorreu a partir do ciclo 140,

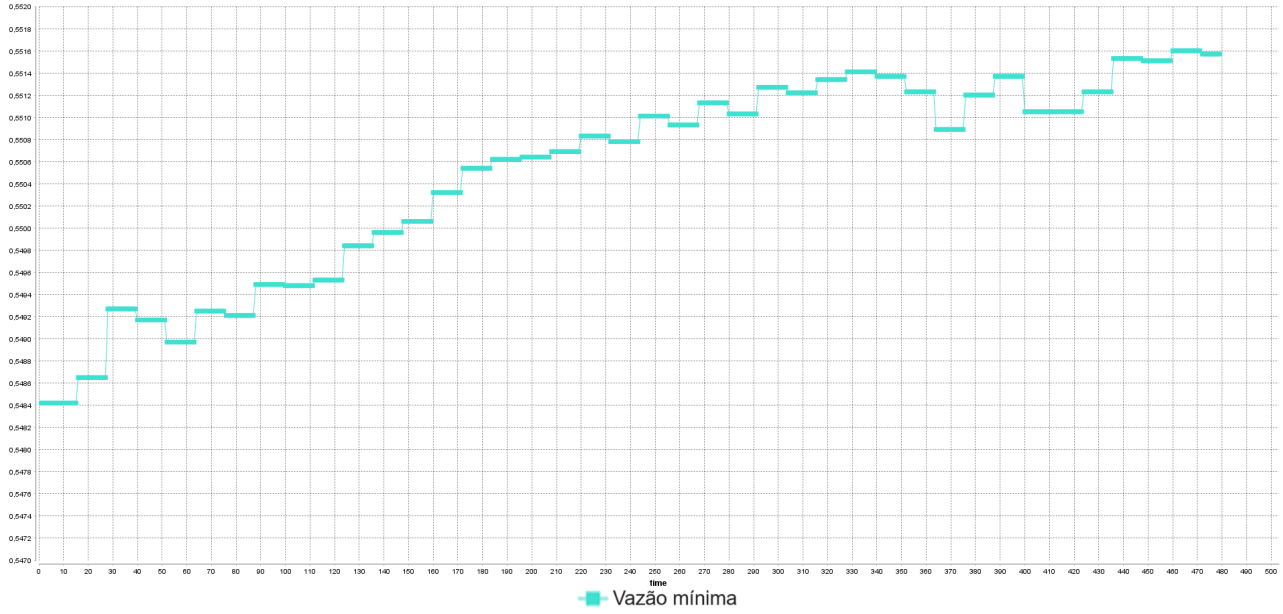


Figura 79: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

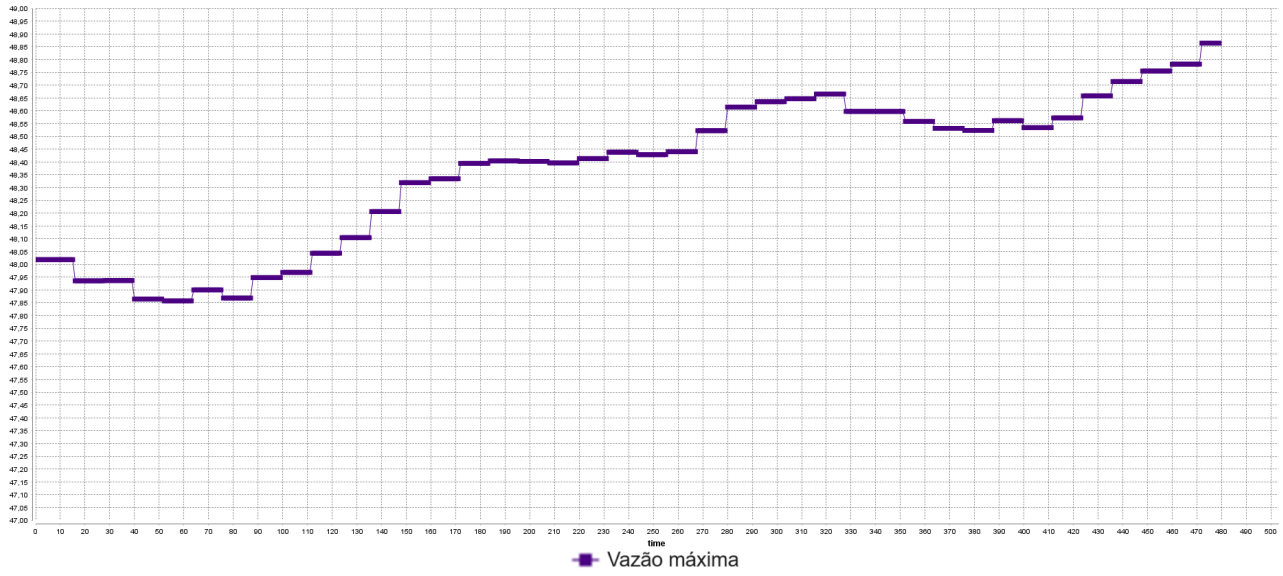


Figura 80: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

aproximadamente. Pode-se vincular a isto a mudança no uso do solo que, a partir deste período, observa-se a agricultura e a mata nativa decrescendo um pouco mais rápido, ao passo em que a silvicultura cresce mais lentamente e solo exposto cresce mais rapidamente.

A Figura 84 apresenta a mudança no uso do solo ao longo da simulação 6. As maiores mudanças ocorridas nesta simulação foram para pastagem e silvicultura, onde chegaram no último ciclo com 26.77% e 8.78% de ocupação do ambiente, respectivamente. Além disso, os usos do solo mais prejudicados foram mata nativa e agricultura, onde finalizaram a simulação ocupando cerca de 8.7% e 45.26% da região, nessa ordem.

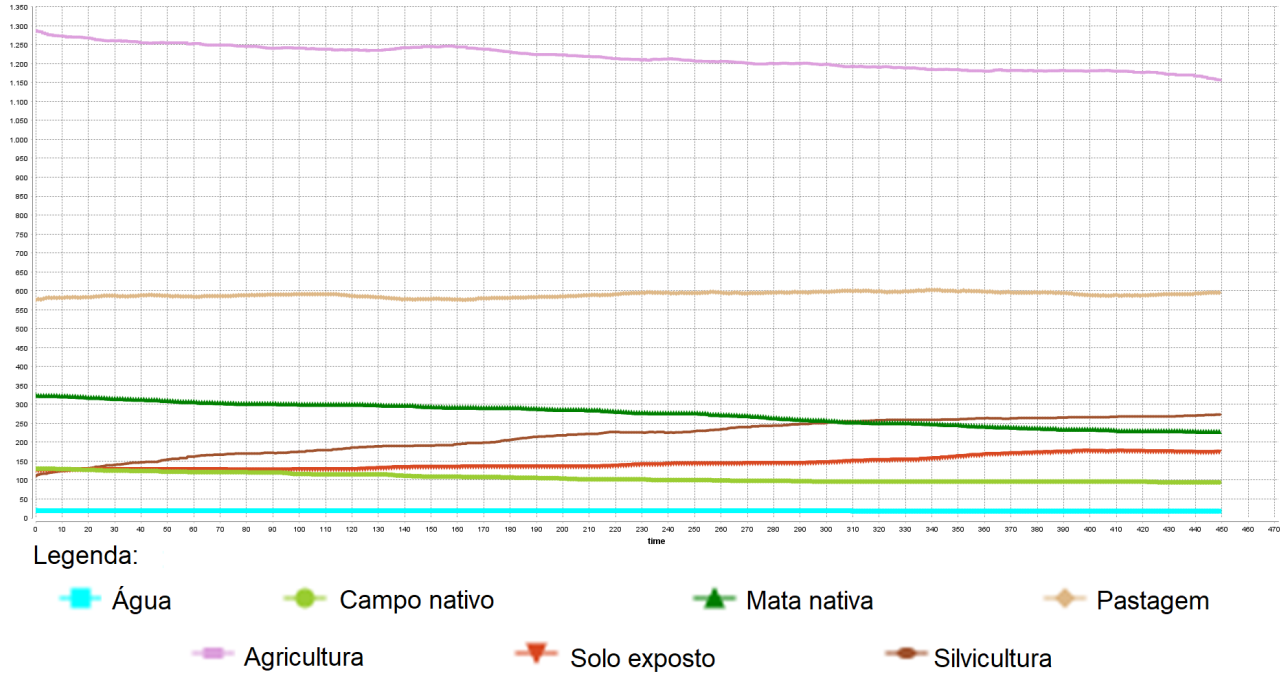


Figura 81: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

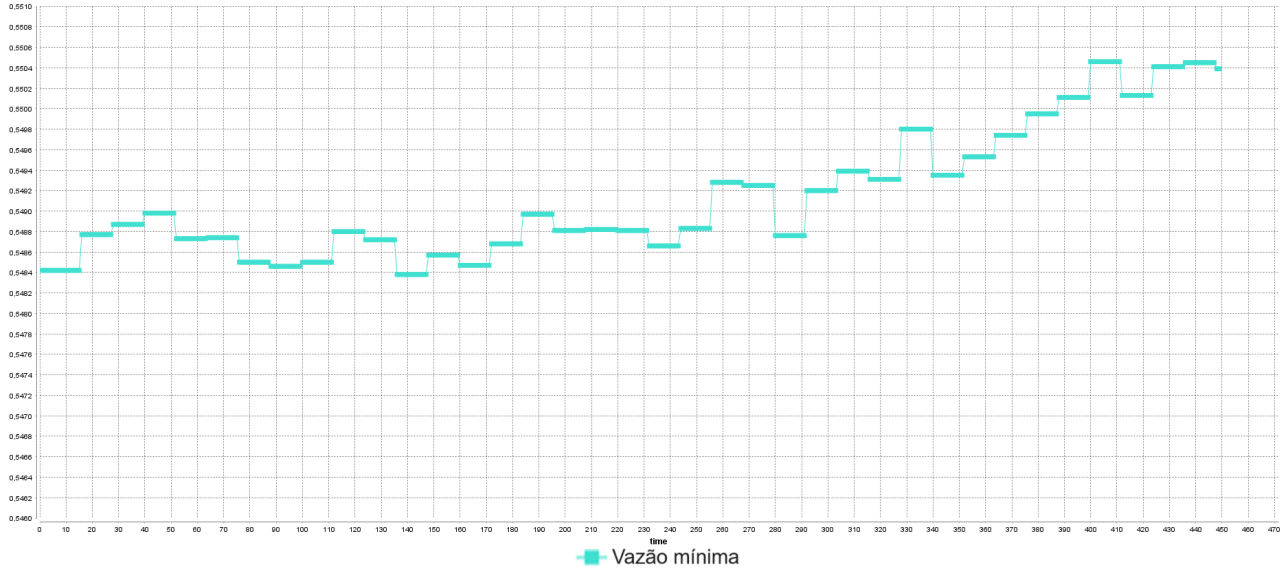


Figura 82: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

Nas Figuras 85 e 86 pode-se observar as vazões máximas e mínimas durante a simulação 6. Percebe-se que as vazões máximas atingiram maiores variações, chegando a valores maiores de vazão, se comparados com as demais simulações até o momento. Entretanto, nesta simulação não foram registradas as maiores mudanças para um determinado uso do solo, se comparadas com as demais simulações. O que pode-se indicar, neste caso, é que a região referente a mata nativa teve maior impacto nesta simulação, enquanto agricultura teve a situação de menor impacto registrada até o momento. Estes podem ser fatores que influenciaram no aumento das

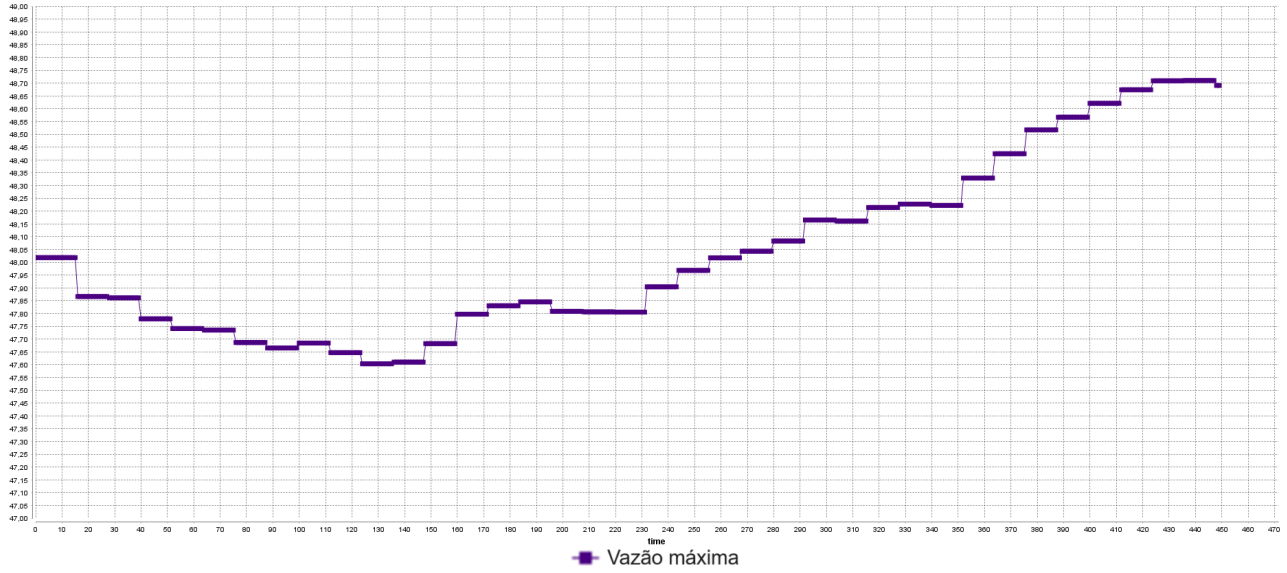


Figura 83: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

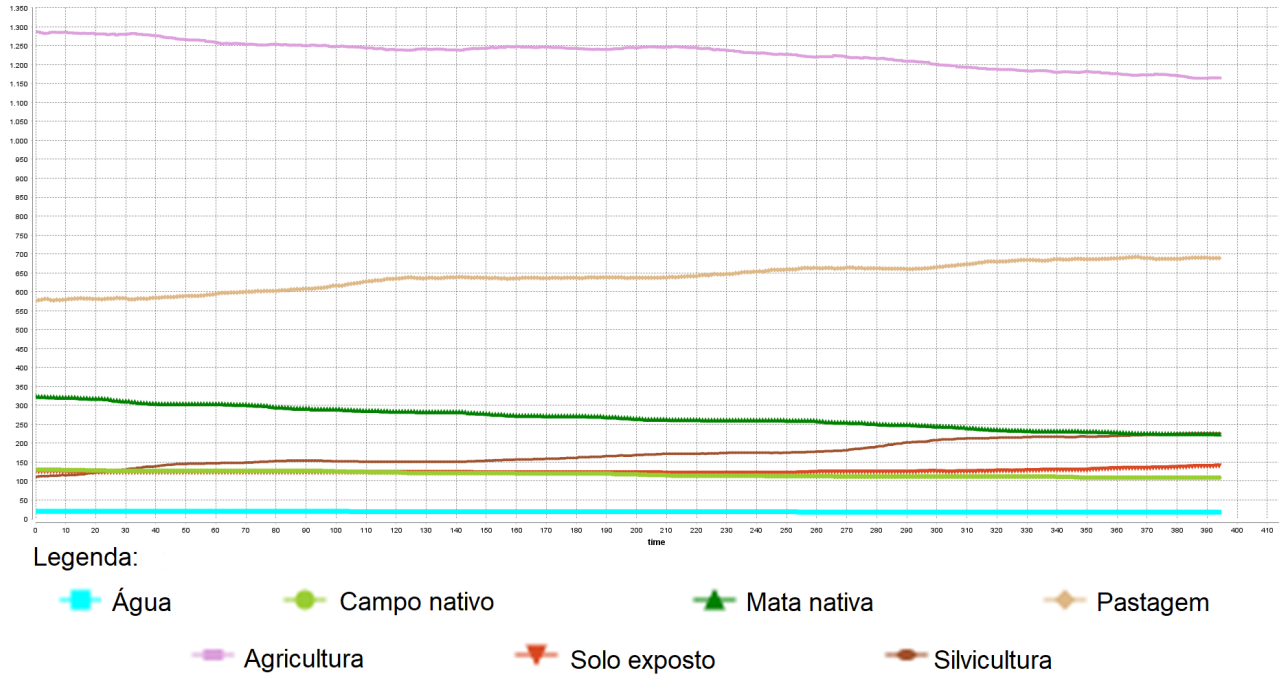


Figura 84: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

vazões máximas. Por outro lado, percebe-se que as mudanças ocorridas não tiveram índices elevados, o que pode ter influenciado no comportamento das vazões mínimas.

A Figura 87 apresenta o gráfico que descreve o comportamento da mudança no uso do solo ao longo da simulação 7. Neste caso, as maiores mudanças ocorreram para pastagem e silvicultura, onde atingiram 28.4% e 14.84% da região, respectivamente. Já as regiões mais afetadas envolveram mata nativa e agricultura, onde chegaram em 9.71% e 37.61% de ocupação do ambiente, nessa ordem. Essa simulação foi a única que gerou impacto negativo para solo

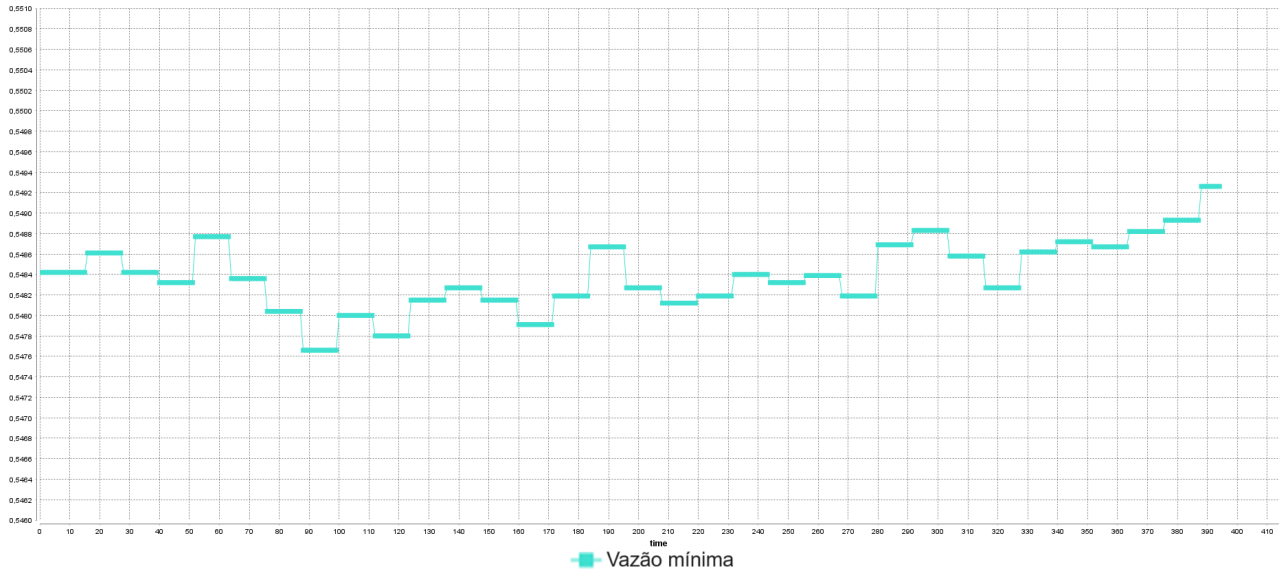


Figura 85: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

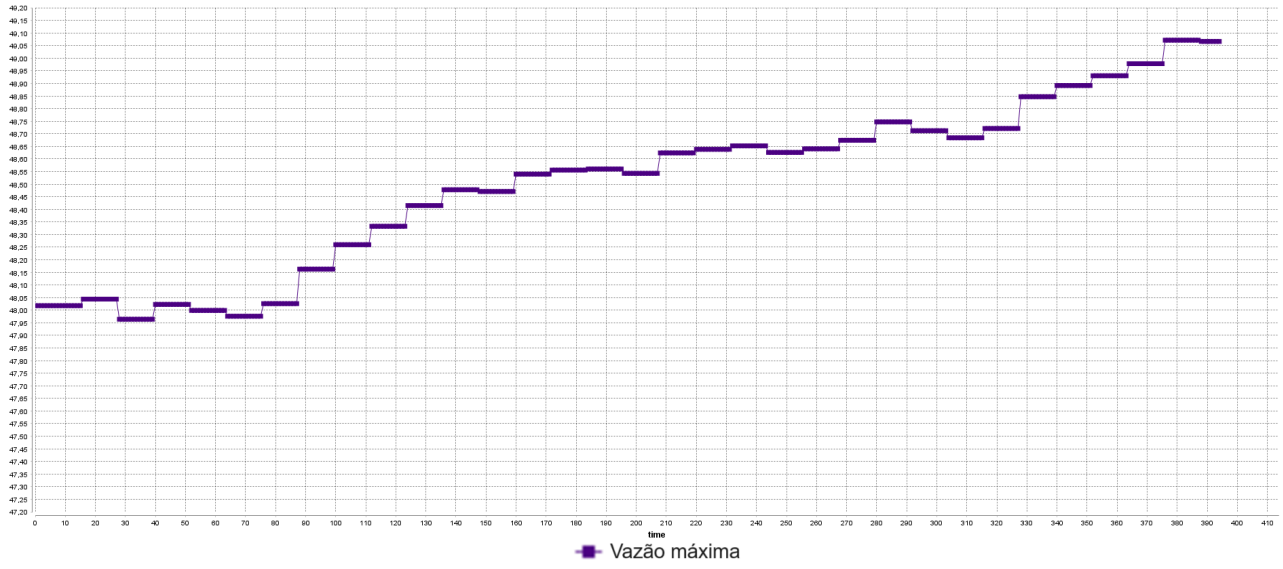


Figura 86: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

exposto, onde este passou de 4.86% para 4.39% de ocupação da região. Esse impacto pode ser observado na Figura 87, onde percebe-se que mata nativa e solo exposto quase se igualam.

Nas Figuras 88 e 89 tem-se os comportamentos das vazões mínimas e máximas da simulação 7, respectivamente. Para este caso, as vazões mínimas não possuem muitas variações relevantes. Já as vazões máximas possuem um comportamento decrescente ao longo de quase toda a simulação. Os fatores vinculados a isto podem estar relacionados ao rápido crescimento da silvicultura e a diminuição de regiões de solo exposto.

O gráfico da Figura 90 mostra o comportamento da mudança no uso do solo ao longo da simulação 8. Visualmente, a mudança mais impactante foi para silvicultura, com comportamento

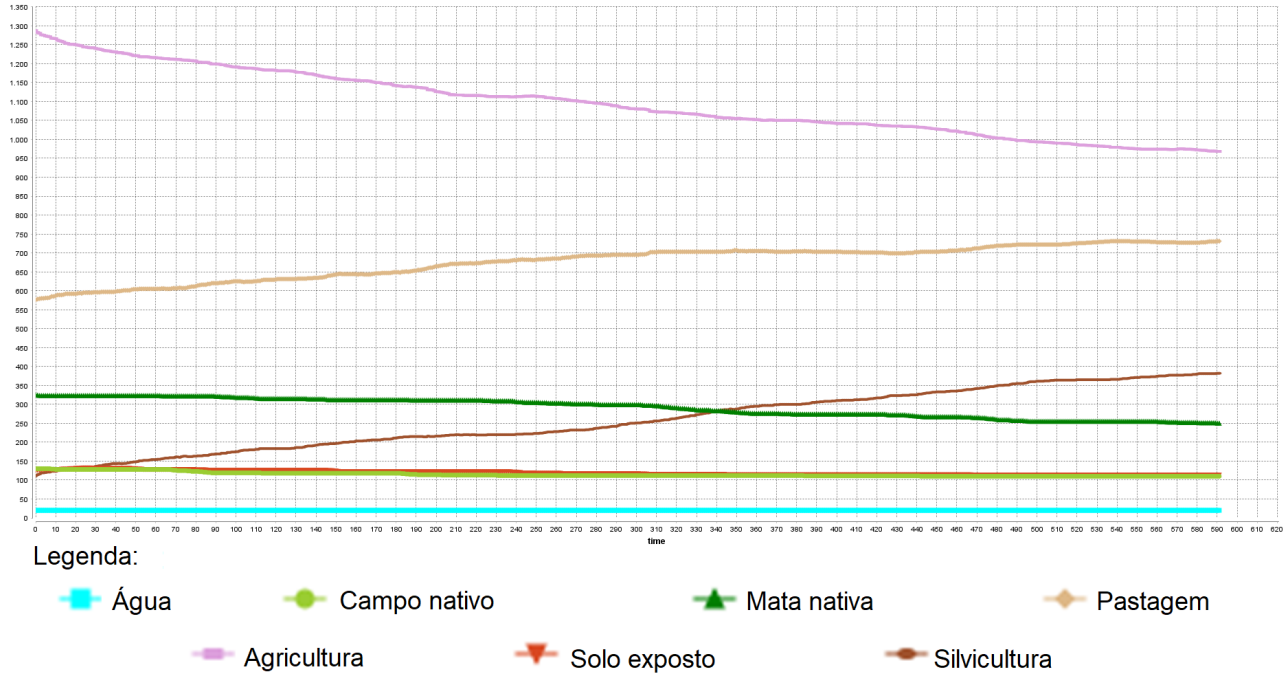


Figura 87: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

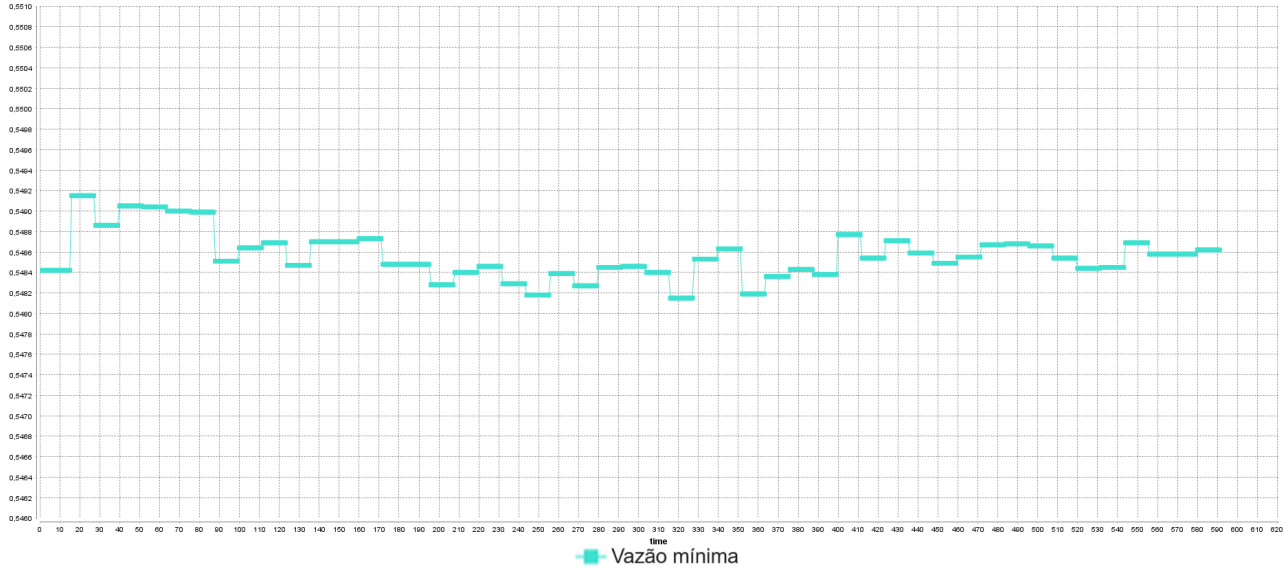


Figura 88: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

crescente ao longo dos ciclos. Entretanto, as maiores modificações ocorreram para pastagem e silvicultura, onde ocuparam, ao final da simulação, 25.41% e 10.10% do ambiente, respectivamente. Já as regiões mais impactadas foram mata nativa e agricultura, chegando em 9.21% e 43.08% do ambiente.

As variações das vazões mínimas e máximas podem ser acompanhadas nas Figuras 91 e 92. A simulação 8, teve resultados simulares aos obtidos na simulação 2. Entretanto, observa-se que as mudanças realizadas envolveram diferentes sub-bacias nessas duas situações. E ainda,

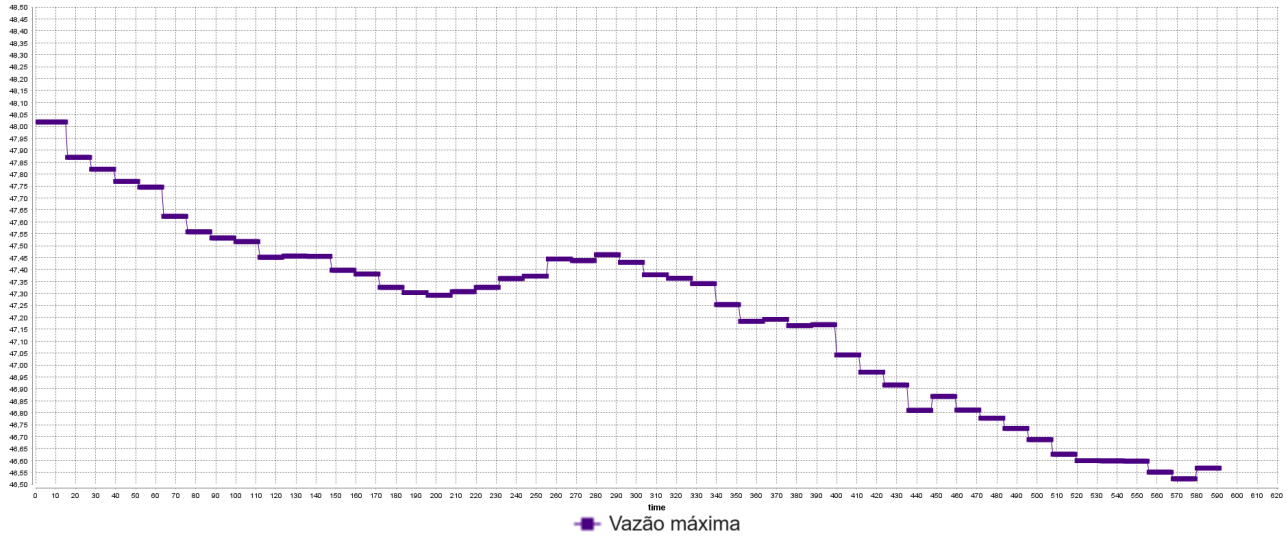


Figura 89: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

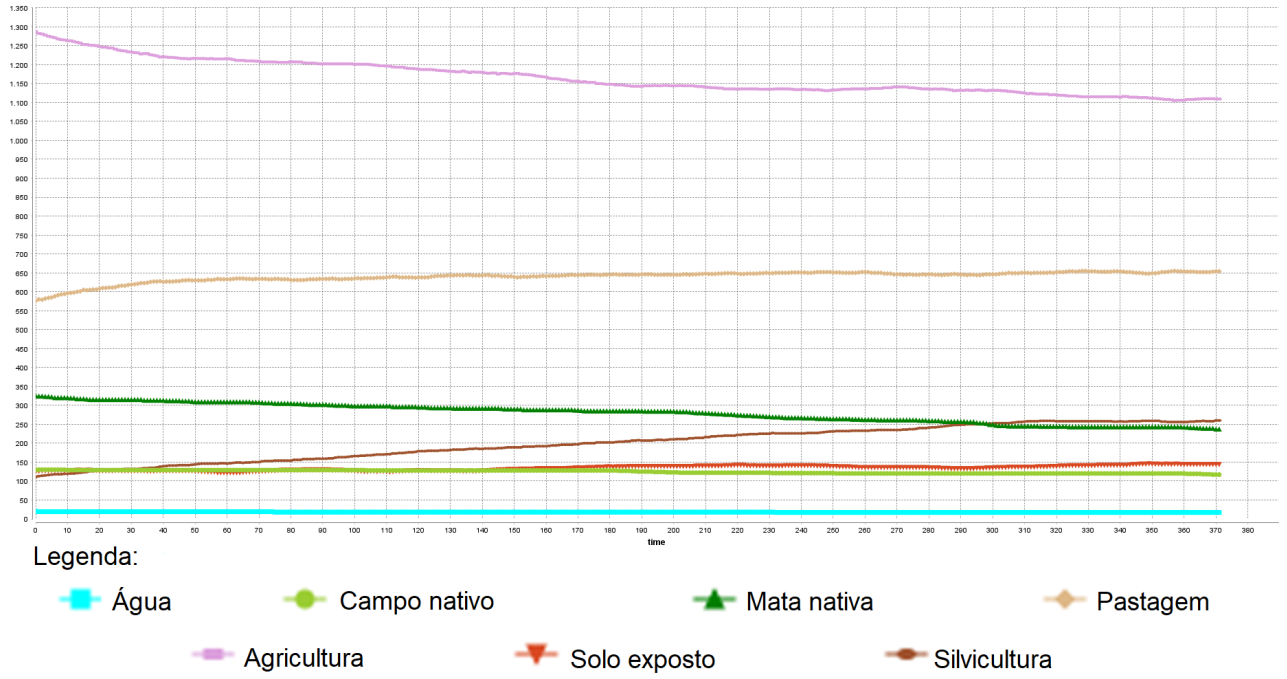


Figura 90: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

na simulação 8 as mudanças foram um pouco maiores para pastagem e um pouco menores para solo exposto, se comparadas a simulação 2. Os resultados geraram vazões mínimas com poucas variações, e vazões máximas crescentes. Pode-se relacionar a isso, a influencia da mudança para solo exposto e pastagem, vinculado ao desmatamento de mata nativa.

Na Figura 93, pode-se observar as mudanças no uso do solo referentes a simulação 9, ao longo dos ciclos. Nesta situação, as mudanças ocorreram em grande parte para pastagem, solo exposto e silvicultura, chegando ao final da simulação em 28.01%, 7.23% e 9.56% da ocupação do

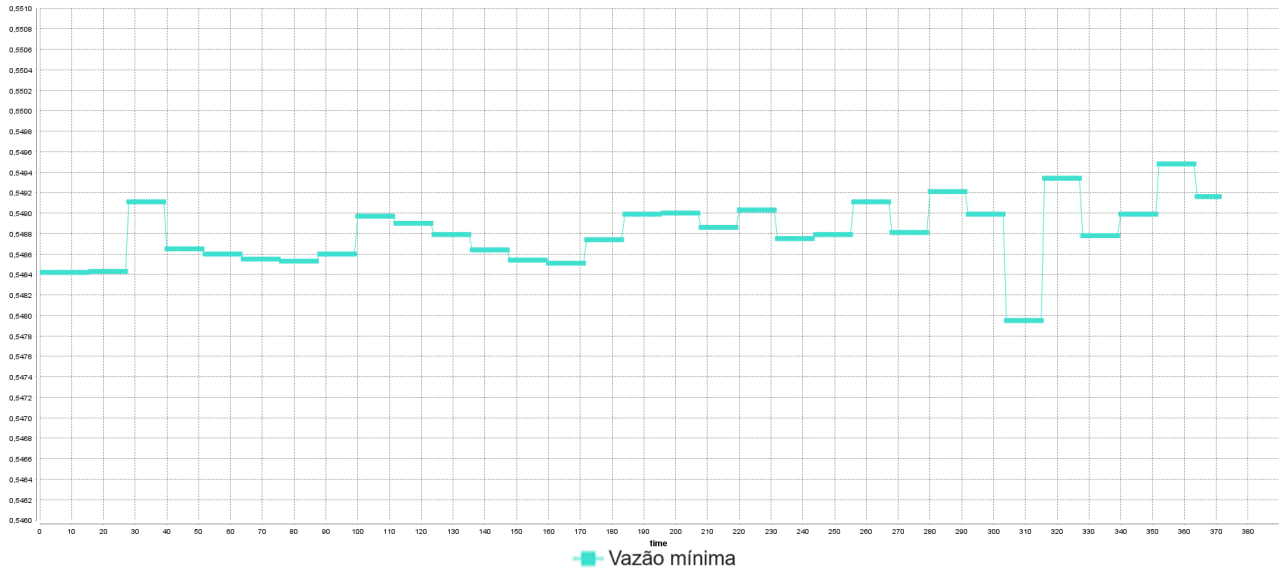


Figura 91: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

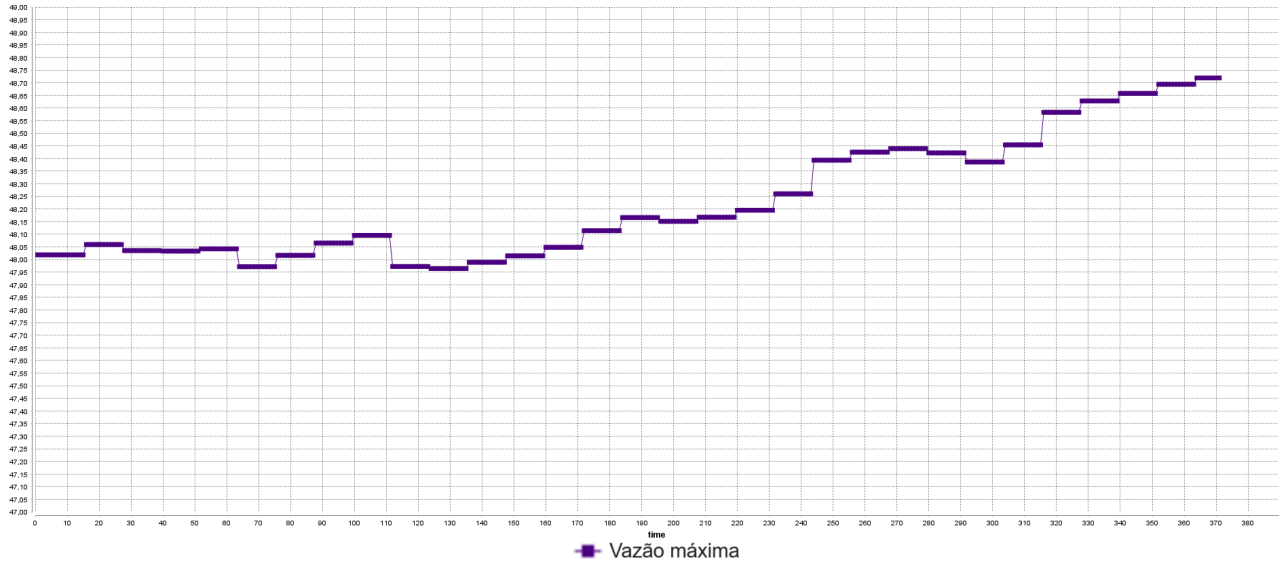


Figura 92: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

ambiente, respectivamente. Os usos do solo mais impactados foram mata nativa e agricultura, finalizando com 9.75% e 40.21% de ocupação na região. Percebe-se, pelo gráfico, que silvicultura não ultrapassa a quantidade de células total referente a região de mata nativa.

As Figuras 94 e 95 descrevem os comportamentos das vazões mínimas e máximas. A simulação 9 mostrou comportamentos de mudança no uso do solo similaridades aos descritos nas simulações 3 e 4, o que refletiu aspectos semelhantes nos resultados das vazões. Nota-se que, as vazões mínimas e máximas foram crescentes ao longo dos ciclos. Alguns fatores de influencia podem estar relacionados as mudanças para solo exposto e pastagem, à medida que as regiões de agricultura e mata nativa decresceram.

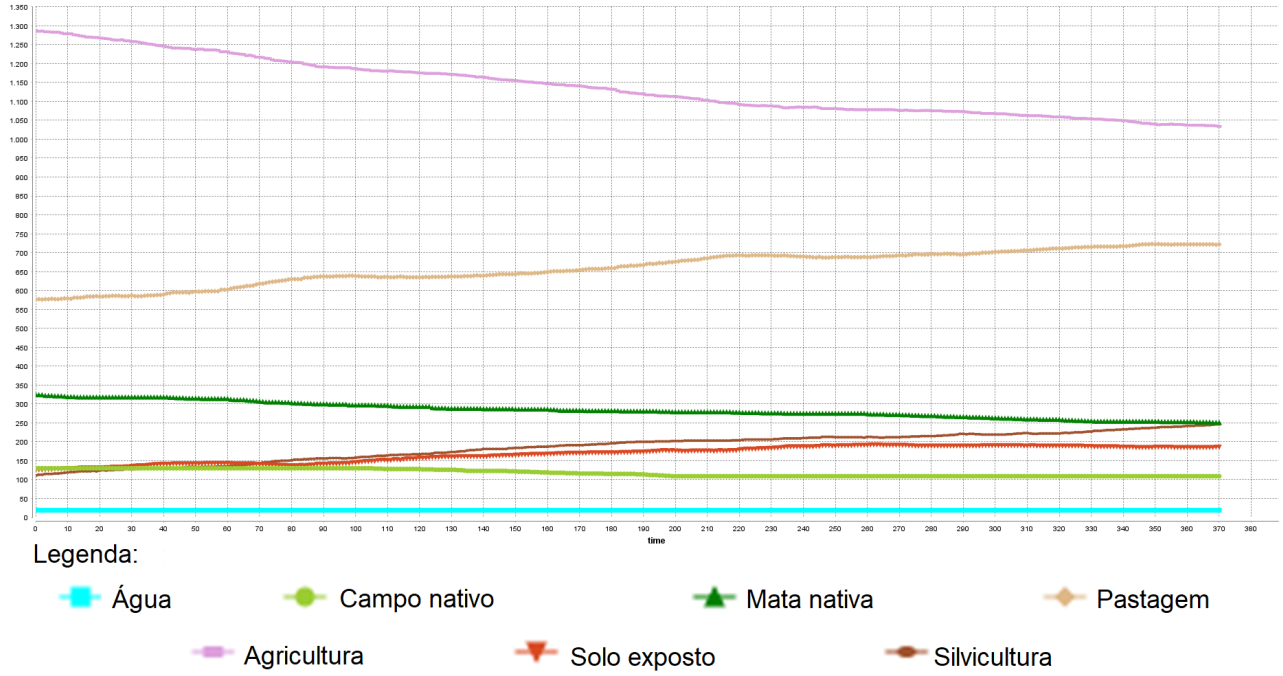


Figura 93: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

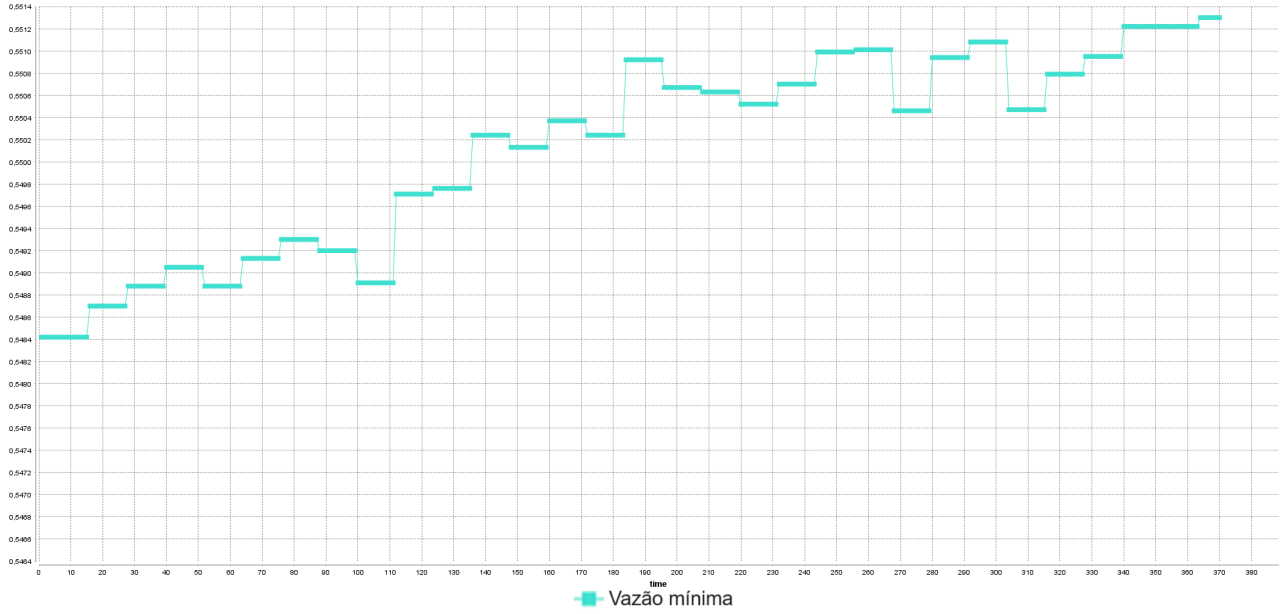


Figura 94: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

O comportamento da mudança no uso do solo, na simulação 10, pode ser visualizado na Figura 96. Nesta simulação, as mudanças mais consideráveis ocorreram para pastagem, solo exposto e silvicultura, onde as mesmas finalizaram a simulação com cerca de 29.29%, 7.69% e 9.13% de ocupação no ambiente, respectivamente. As regiões mais afetadas foram mata nativa e agricultura, chegando a 9.36% e 39.20% da região, nessa ordem.

Nas Figuras 97 e 98 tem-se as vazões mínimas e máximas referentes a simulação 10. Pelas

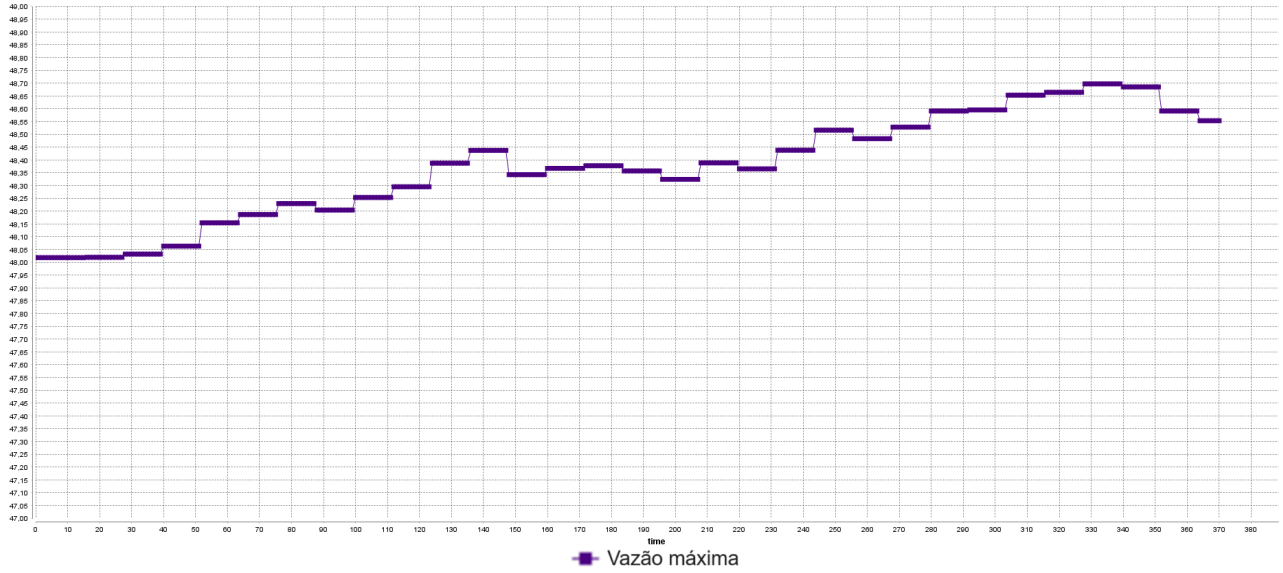


Figura 95: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

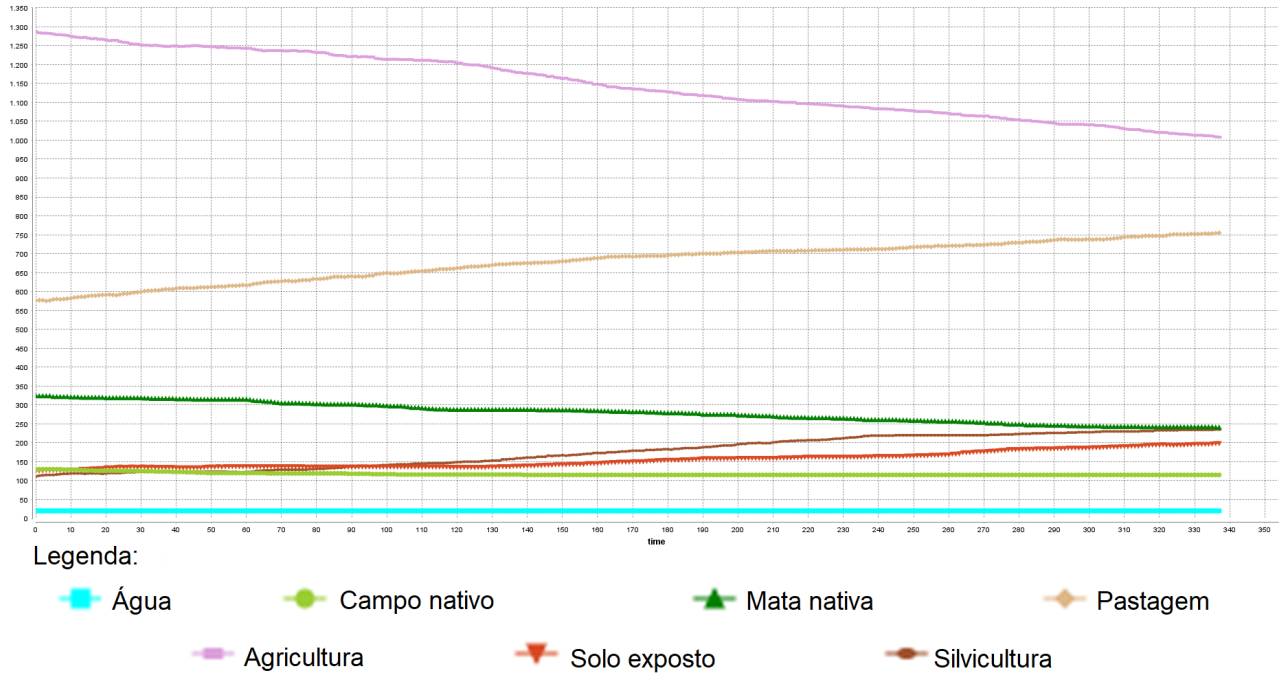


Figura 96: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 2, considerando 20% de mudança total do ambiente.

Figuras 93 e 96, observa-se que há uma grande similaridade entre as simulações 9 e 10, do cenário 2, considerando-se 20% de mudança no ambiente. Entretanto, pode-se visualizar que na simulação 10, tem-se vazões mínimas e máximas com maiores valores. Vale salientar que, a simulação 10 apresentou os maiores valores para as vazões, quando comparada as demais simulações do cenário 2. Um dos fatores para que isso ocorra pode estar associado a mudança para pastagem, da qual foi a maior para este uso, dentre todas as simulações. Outro fator, pode ser o índice de diminuição da região de mata nativa, que foi bastante alto se comparado a

outras simulações. Além disso, obteve-se grande mudança para solo exposto, dessa forma isso também influenciou diretamente nos valores obtidos para as vazões.

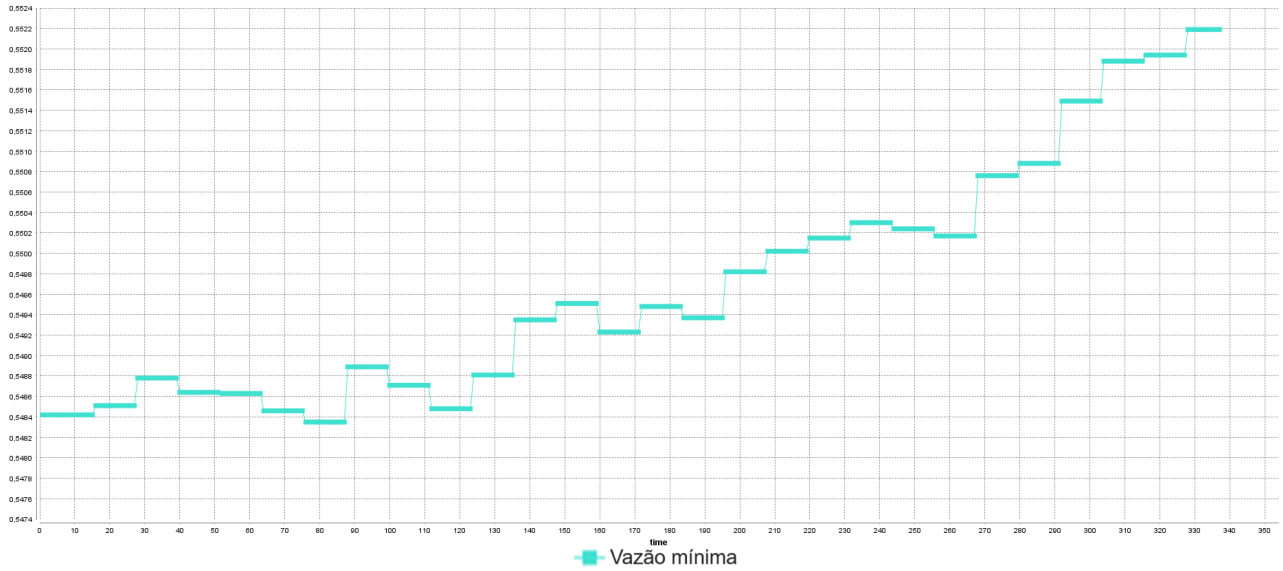


Figura 97: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

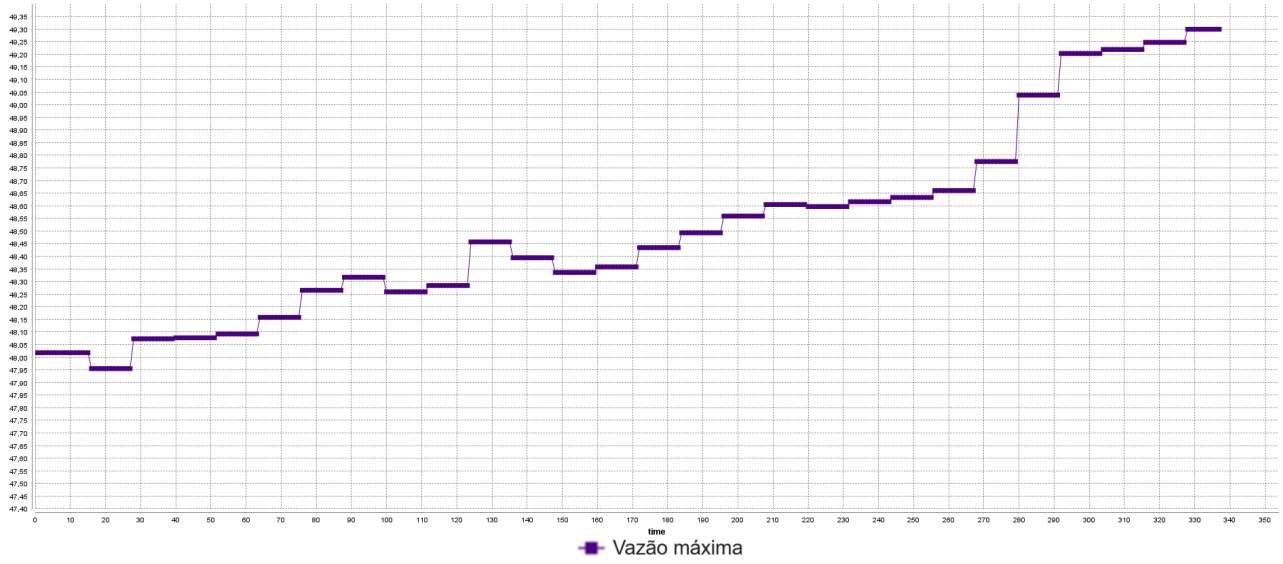


Figura 98: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 2 com 20% de mudança do uso do solo.

No geral, o cenário 2, considerando 20% de mudança no uso do solo apresentou mais situações de modificações para solo exposto e pastagem, e muitos casos de diminuição de áreas de mata nativa, causando aumento nas vazões. Para se fazer um comparativo entre as 10 simulações, tem-se as Figuras 99, 100 e 101, das quais apresentam as vazões mínimas, médias e máximas anuais no último ano simulado.

No gráfico de vazões mínimas, percebe-se que as simulações 1, 2, 4 e 10 geraram resultados elevados se comparados aos valores estimados para os dados atuais. Além disso, nenhuma

simulação subestimou os valores estimados para as vazões atuais. O comportamento das vazões médias variou para cada simulação, onde o menor e o maior valor foram na simulação 7 e na simulação 10, respectivamente. Já as vazões máximas tiveram resultados próximos, exceto a simulação 7, da qual subestimou os valores das vazões.

No geral, os respectivos valores das vazões mínimas, médias e máximas ao longo das simulações tiveram maiores variações, se comparados com a situação anterior. Além disso, considerando a mudança no uso do solo para 20% da região, tem-se uma variação relevante nas vazões médias. Pelas Figuras 99, 100 e 101, observa-se que há variações nos três casos, mesmo que essas sejam baixas. Entretanto, considerando o cenário 2 com 10% de mudança no uso do solo, as vazões mostraram mudanças importantes para estes resultados. Isso indica que, deve-se analisar os possíveis caminhos para o gerenciamento da mudança no uso do solo, pois o impacto ocorre mesmo que a mudança seja para 10% ou 20% do ambiente.

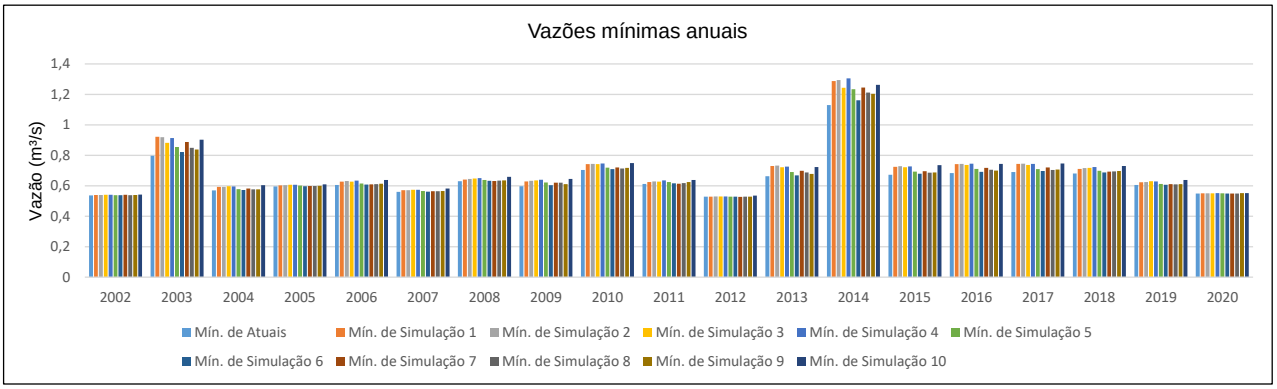


Figura 99: Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

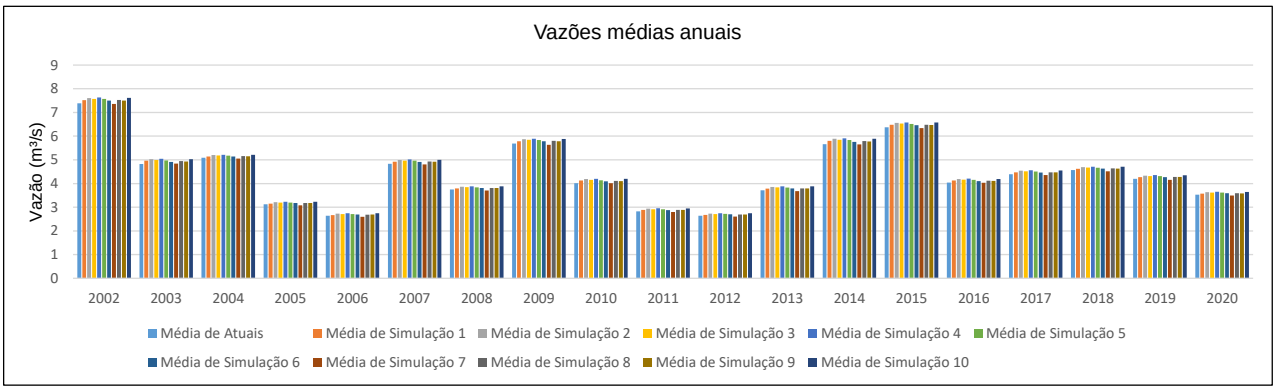


Figura 100: Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Em relação a negociação entre os agentes, tem-se a Tabela 102, que descreve as tentativas, bem como sucessos e cancelamentos de compras de lotes entre os gestores. Pode-se observar que os maiores números de tentativas ocorreram na simulações 2 e 7. De fato, nestas simulações obteve-se os maiores períodos de ciclos. Já as simulações 2 e 3, ambas com os menores períodos

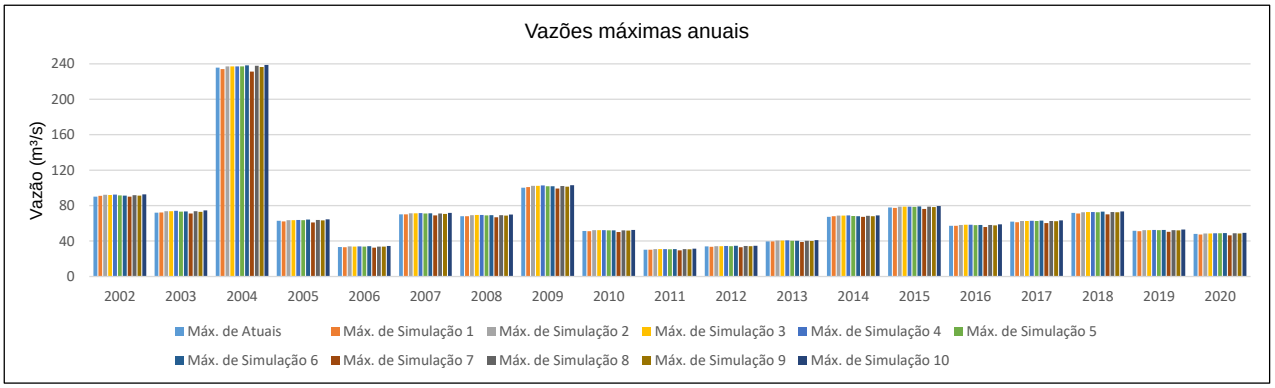


Figura 101: Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

de ciclos, geraram resultaram com tentativas menores no número de compras de lotes. Em todas as simulações, os gestores dependem das porcentagens de venda e de compra, e dos valores de venda e de compra, para finalizar a negociação. Dessa forma, pode-se visualizar que as tentativas bem sucedidas foram menores se comparadas as tentativas negadas.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Tentativas	3417	2145	1747	3707	3732	2739	5478	2397	2594	2461
Negadas	2898	1643	1098	3273	3164	2290	4994	1701	2169	1997
Concluídas	519	502	649	434	568	449	484	696	425	464

Tabela 29: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 2, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Os gráficos representados na Figura 102 representam a dinâmica entre a compra e a venda de lotes entre os gestores ao longo dos ciclos, em cada simulação. Já a Figura 103 apresentam o saldo mensal, por gestor, em cada simulação. Pode-se verificar que as variações foram maiores, se comparadas com a situação 1, apresentada anteriormente.

Assim como na situação 1 com, com 10% de mudança no ambiente, o Gestor0 foi o que obteve menor número de lotes, e menor saldo. Assim como o Gestor14 foi o que obteve maior quantidade de lotes e maior saldo. Esses resultados são esperados, uma vez que o Gestor0 inicia a simulação como responsável pelas sub-bacias 0, 1 e 2, já o Gestor14 é o responsável pelas sub-bacias 37 e 38. Quando se compara as regiões das sub-bacias referentes aos dois agentes, percebe-se que o número de células de um é muito maior do que a o outro, visto que o Gestor0 inicia com 42 lotes, e o Gestor14 com 430 lotes. Isso é semelhante para os demais agentes.

Os valores iniciais podem influenciar o sistema. Entretanto, dependendo da situação, pode-se obter novos comportamentos. Na Figura 102 pode-se observar que na simulação 8, o Gestor13 ultrapassou a quantidade de lotes do Gestor14, e do Gestor0 ultrapassou do Gestor1, Gestor9 e Gestor11. Já na simulação 10, o Gestor0 ultrapassou o Gestor2 e Gestor9. Entretanto, é necessário mais tempo de simulação para se ter mudanças maiores.

Os resultados do cenário 2, com 20% de mudança no ambiente, foram satisfatórios, tanto para o comportamento social como para o comportamento hidrológico. Em todas as simulações,

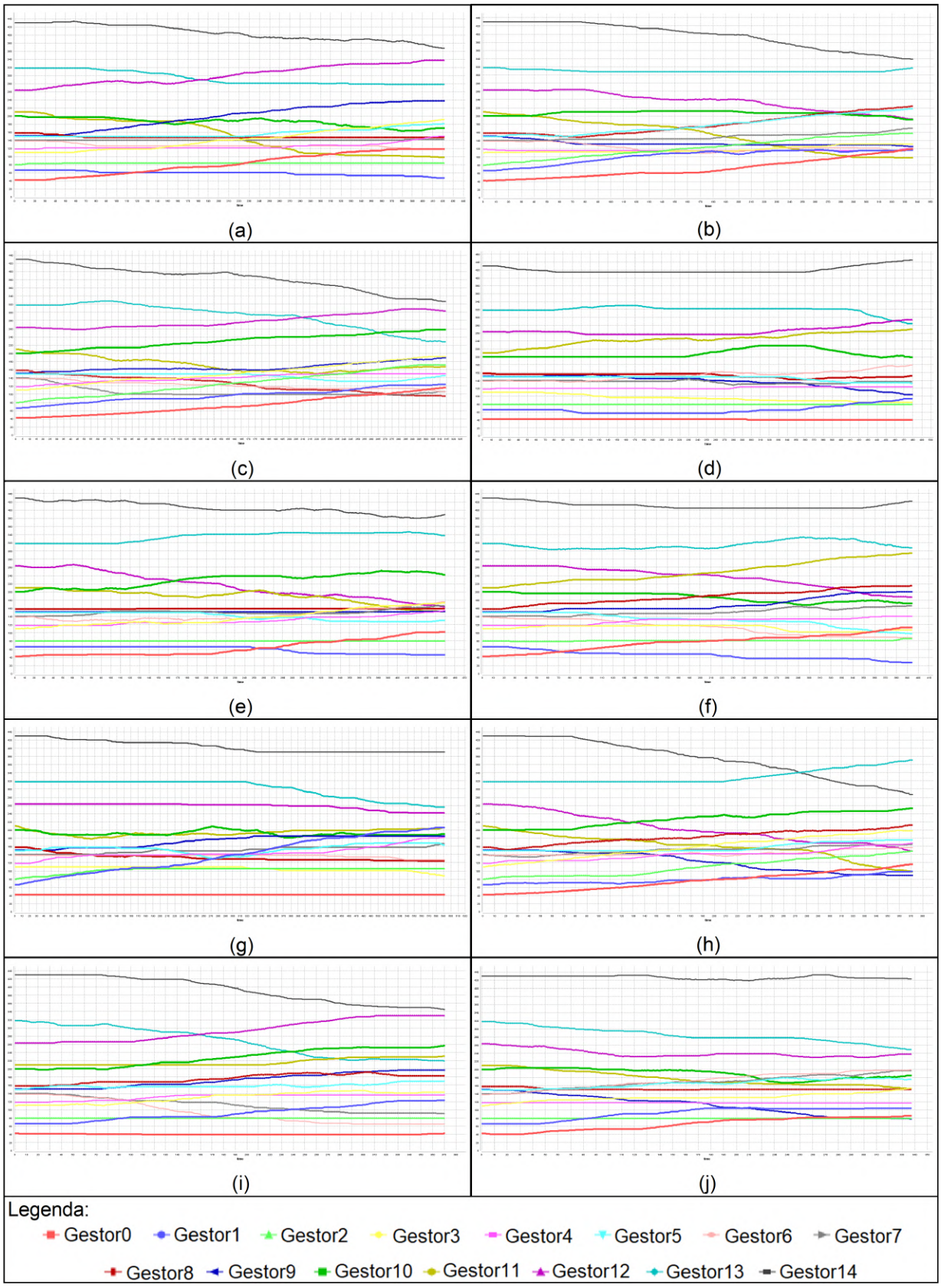


Figura 102: Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

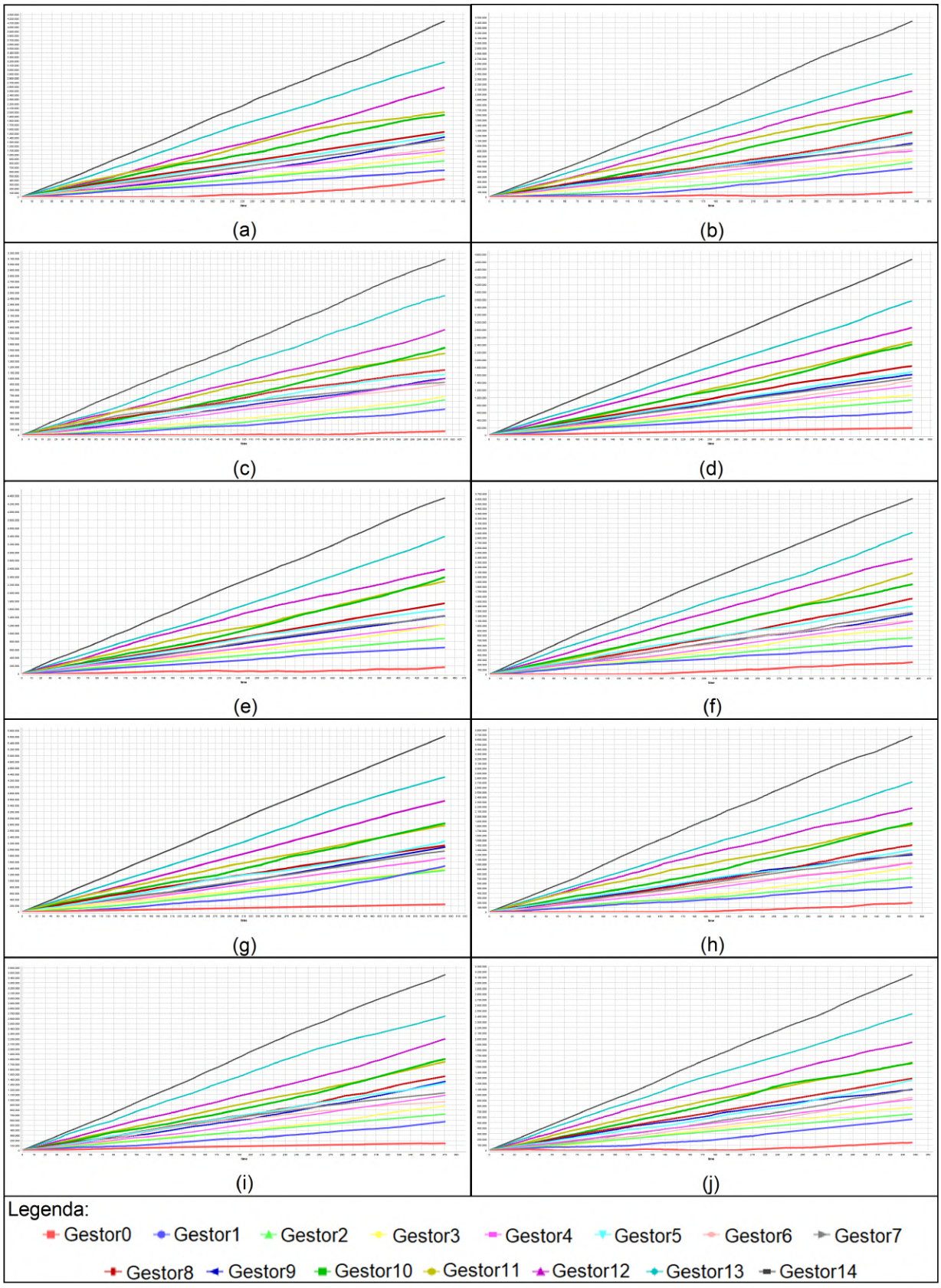


Figura 103: Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

as vazões corresponderam as mudanças ocorridas no ambiente. E ainda, as negociações entre os gestores mostram a relação entre propriedade e produção. Além disso, as situações 1 e 2 mostraram que o cenário 2 indica que a mudança no uso do solo, mesmo que em pequena escala, gera influências nos sistemas social e hidrológico. Nesse sentido, o SMA acoplado ao modelo LASH descrevem o sistema sócio-hidrológico, considerando o cenário 2. A próxima seção apresenta os resultados para o cenário 3, onde foi considerada a mudança, de forma aleatória, de 20% no uso do solo.

4.2.3 Cenário 3: Mudanças aleatórias do uso do solo

O Cenário 3 foi definido neste trabalho a partir de dois objetivos. Primeiro, buscou-se analisar a variação no ambiente após a mudança aleatória de 20% no uso do solo. Além disso, pretende-se gerar um comparativo entre os impactos hidrológicos obtidos nos Cenários 2 e 3, considerando a mudança de 20% no uso do solo. No Cenário 2 os gestores modificaram o uso do solo a partir das tendências estabelecidas, gerando regiões transformadas. No Cenário 3, os gestores podem modificar o ambiente de maneira mais livre, tanto no direcionamento, como na mudança no uso do solo.

A Figura 104, tem-se os parâmetros utilizados para gerar 10 simulações para o Cenário 3. Pode-se notar que, assim como no Cenário 2, o Cenário 3 apresenta 15 gestores, e, neste caso, o parâmetro `Atribuir tendências` é considerado falso antes da simulação. Dessa forma, o parâmetro `Intenção randômica` foi considerado verdadeiro, ou seja, para cada gestor uma intenção foi gerada de forma aleatória na instância dos dados, dentre: agricultura; pastagem; solo exposto; e silvicultura. E ainda, o critério de parada da simulação foi dado pela quantidade de mudança no uso do solo, da qual deve ser igual ou menor a 515, o equivalente a 20% de mudança do ambiente.

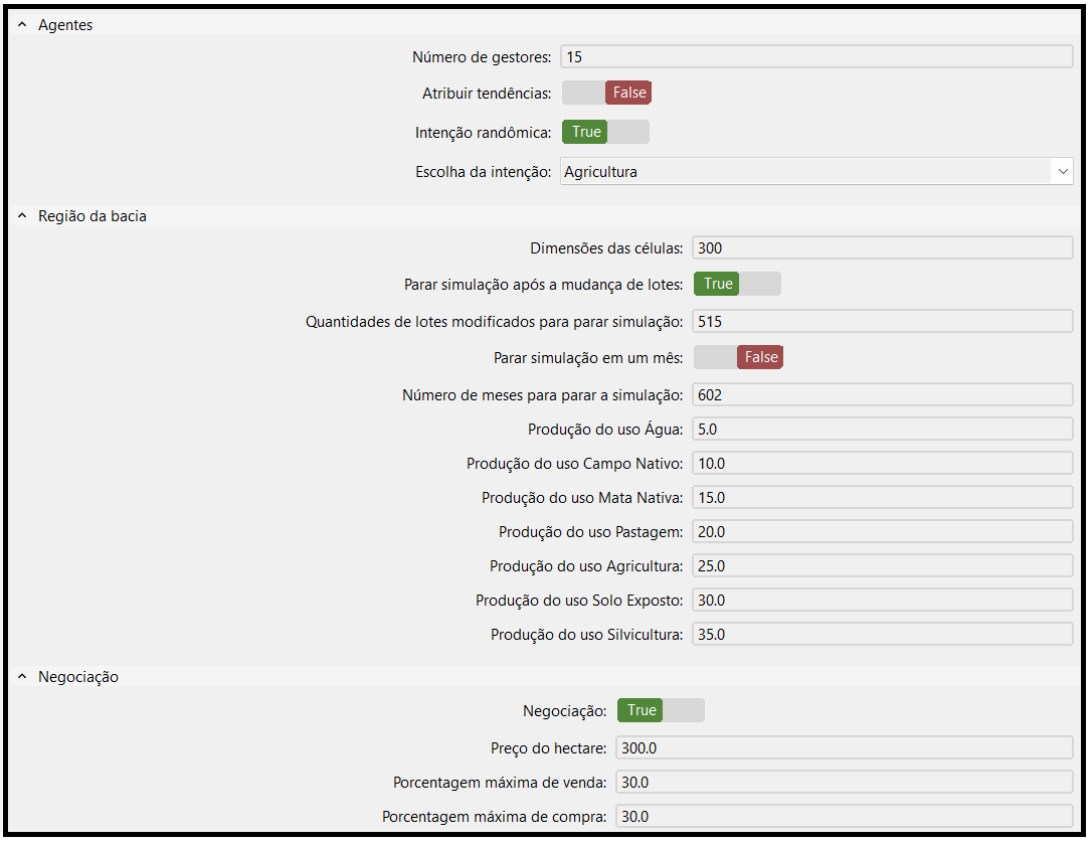


Figura 104: Parâmetros iniciais para o cenário 3, considerando 20% de mudança do uso do solo no ambiente - 515 células.

As intenções geradas em cada uma das simulações, para cada gestor, podem ser visualizadas na Tabela 30. Pode-se observar que, no geral, os usos do solo variaram, exceto nas simulações

8 e 9, em que ocorrem sequências com mesmas intenções para os agentes. Além disso, na simulação 4 não houve mudança para agricultura, visto que nenhum gestor possuiu esse uso do solo como intenção.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Gestor0	S	SE	A	S	P	P	P	P	A	A
Gestor1	S	S	SE	P	SE	A	S	S	A	P
Gestor2	A	S	P	S	SE	P	S	S	P	S
Gestor3	SE	SE	SE	P	S	SE	P	SE	S	S
Gestor4	P	S	P	P	P	P	P	P	P	S
Gestor5	P	S	S	S	SE	A	SE	P	S	A
Gestor6	SE	SE	SE	SE	SE	A	P	P	S	P
Gestor7	S	P	P	S	A	S	SE	A	P	SE
Gestor8	P	S	S	P	P	A	A	P	P	A
Gestor9	A	P	S	P	P	P	SE	S	A	A
Gestor10	SE	S	A	SE	SE	A	P	S	A	SE
Gestor11	A	S	A	S	P	A	A	S	A	S
Gestor12	A	S	S	P	A	S	P	S	A	SE
Gestor13	S	SE	P	P	A	SE	SE	S	A	P
Gestor14	A	A	A	P	A	P	S	S	A	A

Tabela 30: Objetivos de mudança no uso do solo de acordo com as intenção dos agentes, definidas em cada simulação (S) do cenário 3, onde tem-se: A para agricultura; P para pastagem; S para silvicultura; e SE para solo exposto.

Em cada simulação a quantidade de células por uso do solo foi contabilizada no início da simulação. A partir disso, após a mudança no uso do solo, gerou-se os valores numéricos da quantidade final de células referente a cada uso do solo no ambiente. Os resultados para as simulações do Cenário 3 está na Tabela 31. Comparados aos resultados do Cenário 2, percebe-se que, neste caso, as mudanças resultaram em variações maiores.

Uso do solo	I	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Água	20	14	16	20	9	17	13	9	18	11	17
Campo Nativo	130	70	102	119	78	101	89	63	98	77	105
Mata Nativa	325	211	267	200	260	217	237	283	295	243	201
Pastagem	576	430	491	664	822	594	544	744	541	414	585
Agricultura	1287	1380	1125	1093	1035	1221	1322	1047	1080	1479	1210
Solo Exposto	125	240	247	124	101	249	132	271	103	105	174
Silvicultura	111	175	288	250	242	136	206	153	408	218	225

Tabela 31: Quantidade total de células referente a cada uso do solo, no início (I) e ao final de cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

A mudança no uso do solo, em cada simulação, pode ser visualizada através das Figuras 105 e 106. Pode-se observar que as mudanças no uso do solo não ocorrem de uma forma concentrada por região. Através das simulações, tem-se os caminhos que os gestores geraram ao modificar o ambiente, através das células que percorreram. Além disso, pode-se perceber que as sub-bacias possuem mais de uma mudança no uso do solo, o que difere do Cenário 2.

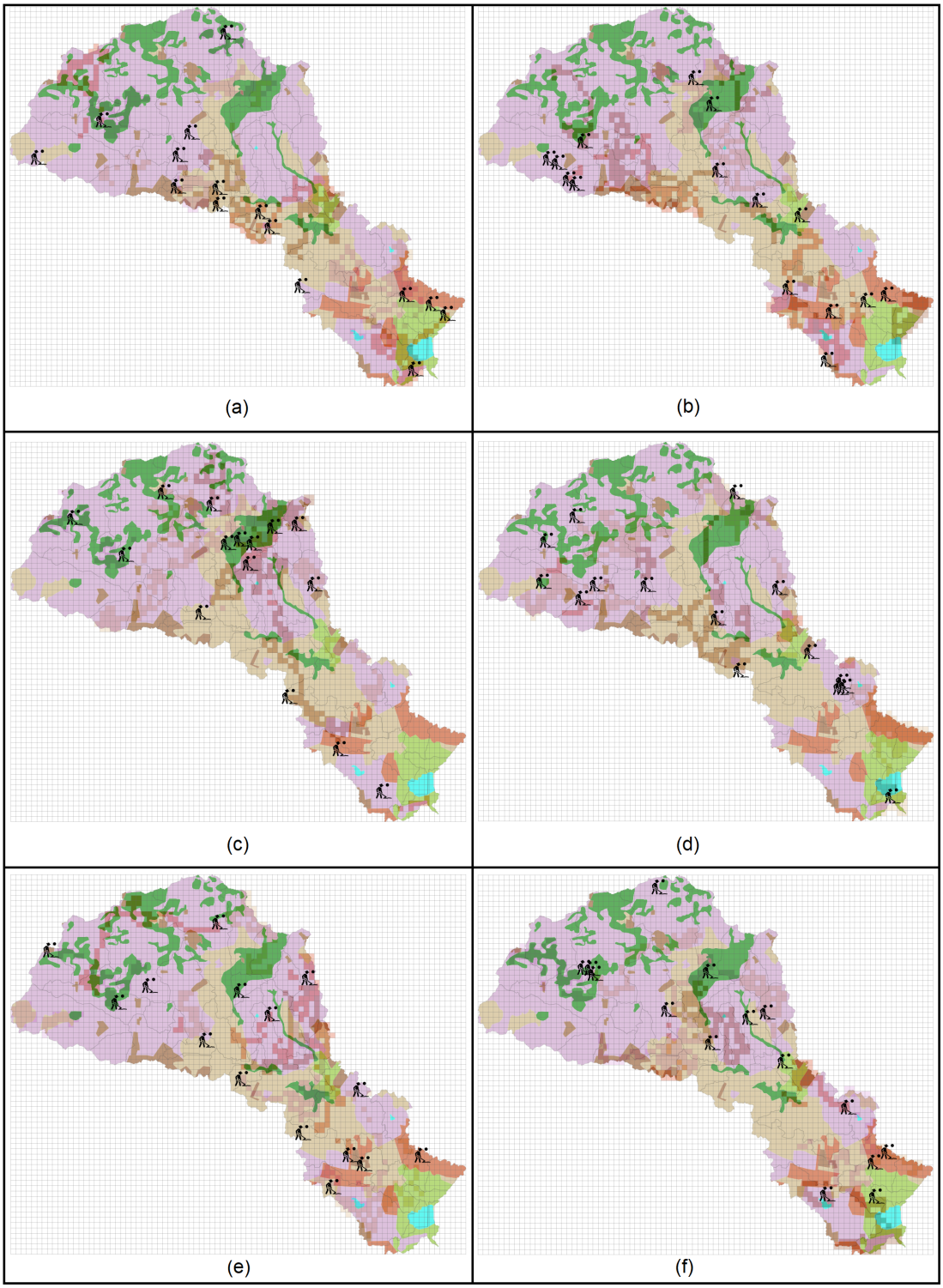


Figura 105: Ambientes finais do SMA, no cenário 3, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6.

Já o tempo decorrido, em ciclos, de cada simulação é apresentado na Tabela 32. Percebe-se que, no Cenário 3 a variação temporal também foi menor, se comparada ao Cenário 2. As simulações 9 e 6 tiveram o menor e o maior número de ciclos, 180 e 271, nessa ordem. Para apresentar maiores detalhes, cada simulação será comentada separadamente a seguir.

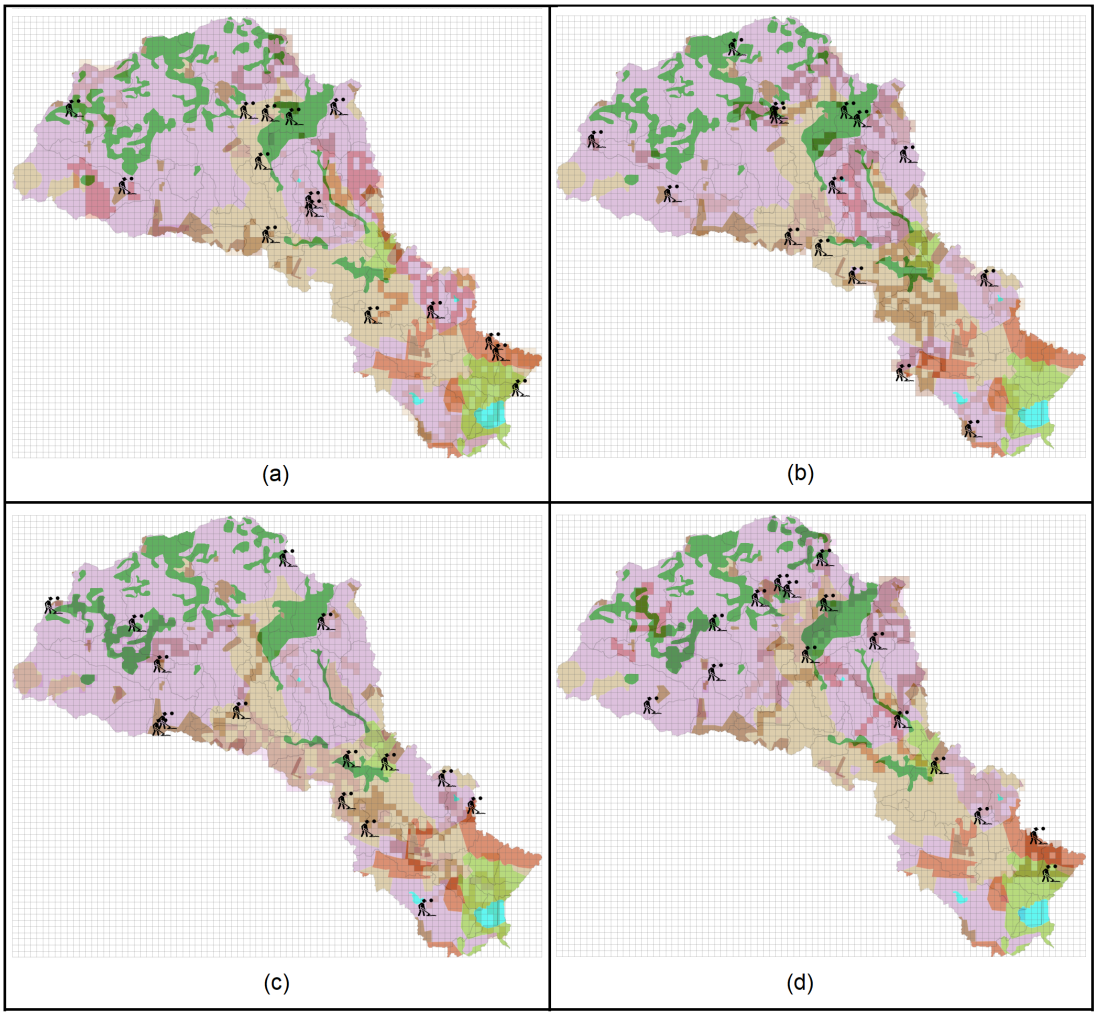


Figura 106: Ambientes finais do SMA, no cenário 3, após a mudança de 20% do uso do solo, nas simulações: (a) 7; (b) 8; (c) 9; e (d) 10.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Ciclos	198	185	251	210	205	271	183	212	180	193
Anos	16,5	15,4	20,9	17,5	17,1	22,6	15,3	17,7	15	16,1

Tabela 32: Quantidade de ciclos em cada simulação (S) do SMA em GAMA, e respectivo tempo em anos, para o cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Na Figura 107 tem-se o comportamento da mudança no uso do solo do Cenário 3, durante a simulação 1. Pode-se observar que, para esta simulação, as mudanças que mais ocorreram foram para agricultura, solo exposto e silvicultura. A mudança para agricultura passou de 50% para 53.61% de ocupação da região. Já de solo exposto passou de 4.86% para 9.32%. E silvicultura iniciou a simulação com 4.31%, e finalizou com 6.80% da região ocupada. As áreas mais afetadas envolveram campo nativo, mata nativa e pastagem. Campo nativo ocupava cerca de 5.05% e passou a contemplar 2.72% da região. Mata nativa passou de 12.63% para 8.20%. E pastagem passou de 22.38% para 16.71% de ocupação da região. A Figura 105(a) apresenta o ambiente ao final da simulação.

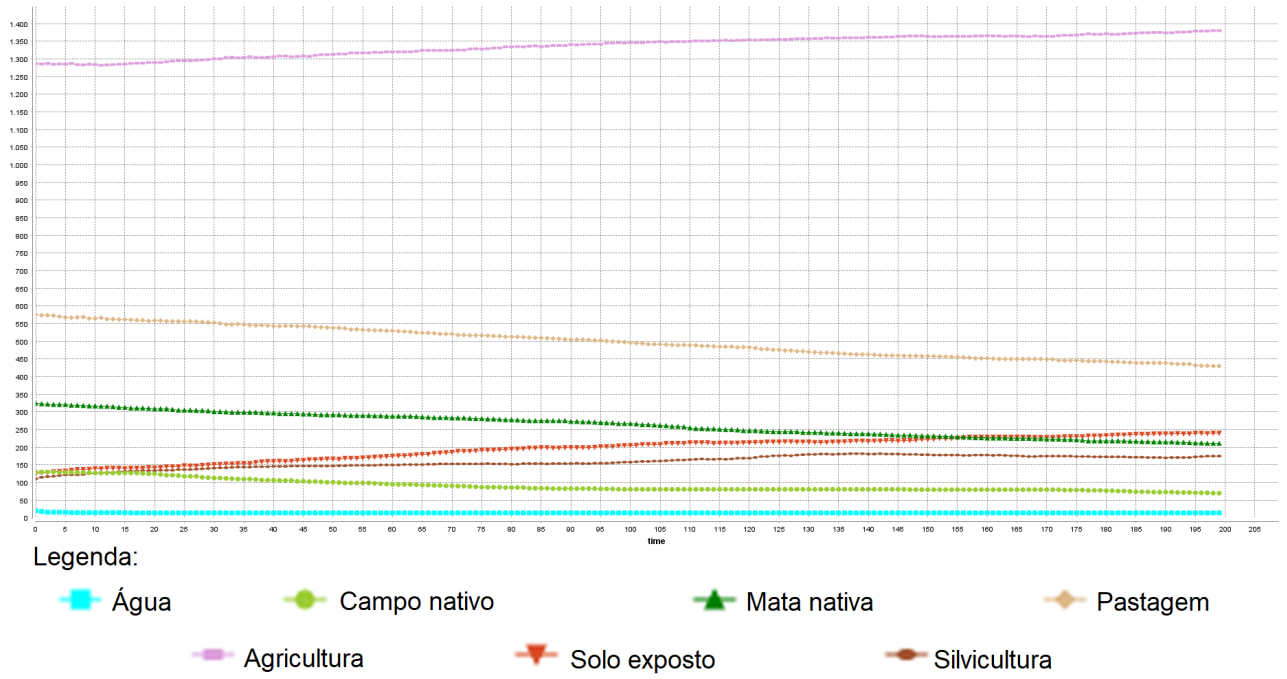


Figura 107: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 1, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

Nas Figuras 108 e 109 tem-se o comportamento das vazões mínimas e máximas ao longo da simulação 1. Observa-se que ambas cresceram ao longo de quase todo o período de simulação. Esse comportamento está vinculado a mudança no uso do solo, uma vez que as modificações ocorridas geraram regiões de desmatamento. Como mencionado na Seção 4.2.1, esse comportamento gera uma tendência no aumento das vazões no ambiente. Neste caso, pode-se constatar que as vazões simuladas acompanharam as mudanças geradas no SMA.

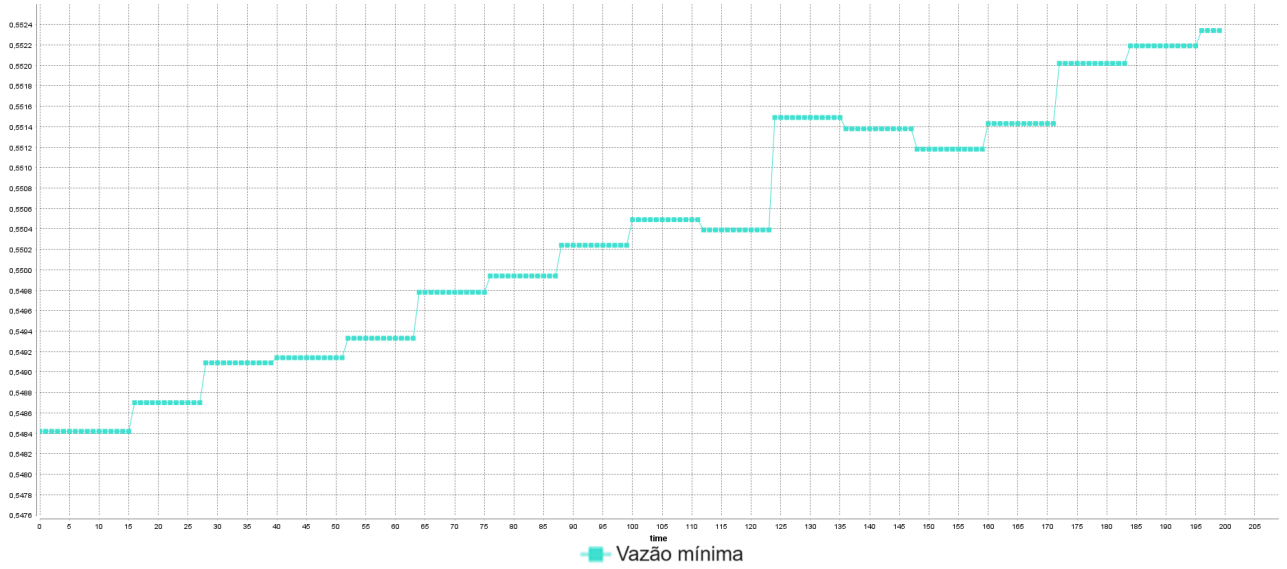


Figura 108: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

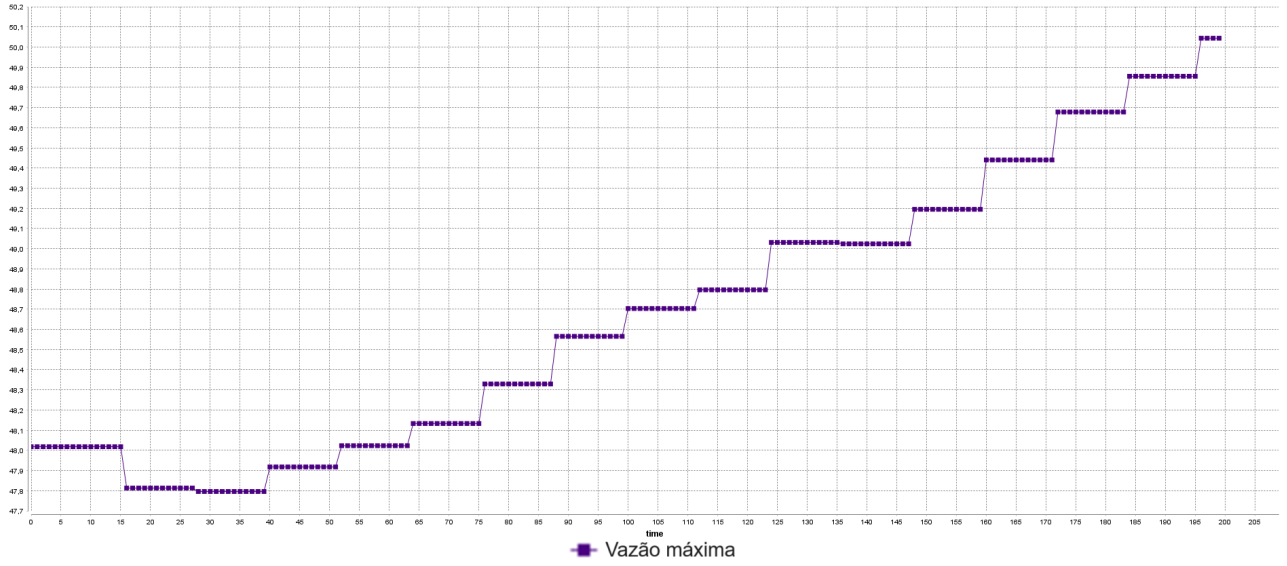


Figura 109: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 1 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

A Figura 110 apresenta a mudança no uso do solo para a simulação 2. Neste caso, percebe-se que as maiores modificações foram para solo exposto e silvicultura. Ao final da simulação, solo exposto atingiu 9.60% de ocupação da região, e silvicultura 11.19%. Neste caso, mata nativa, pastagem e agricultura foram as mais afetadas. Essas regiões chegaram em 10.37%, 19.08% e 43.71% de ocupação do ambiente, respectivamente. Visualmente, observa-se que solo exposto, silvicultura e mata nativa finalizam a simulação com um número de células muito próximo.

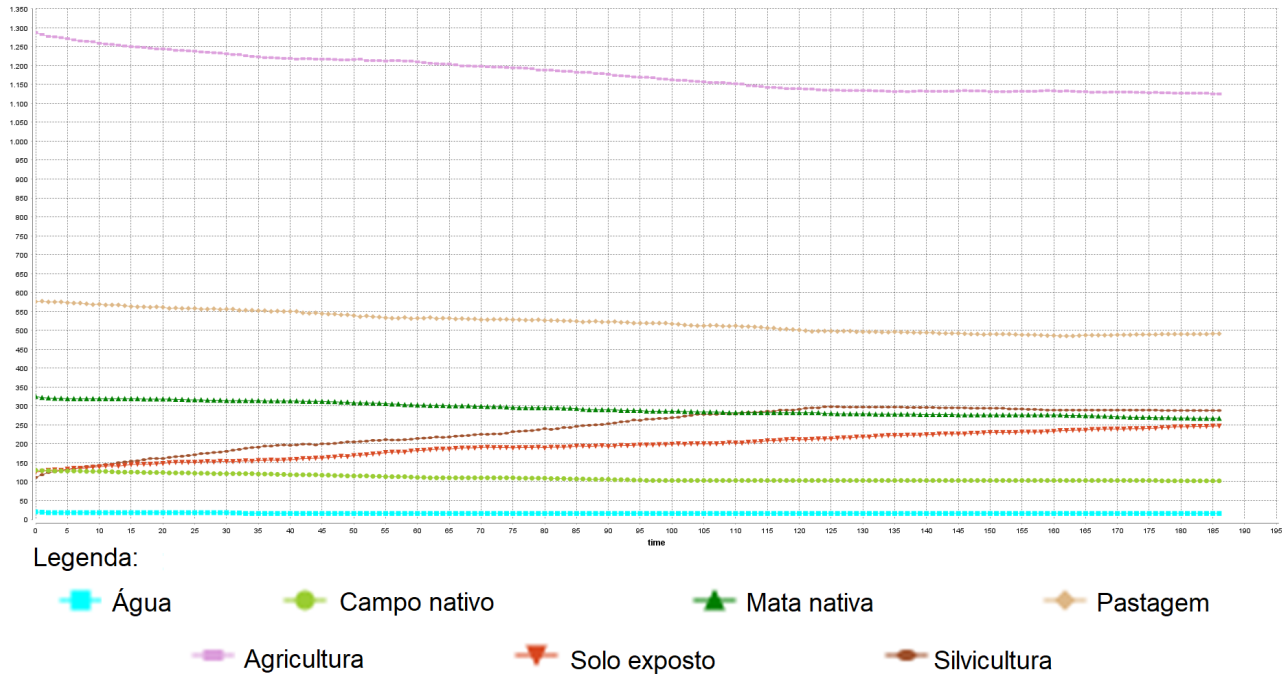


Figura 110: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 2, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

Os comportamentos das vazões mínimas e máximas da simulação 2 pode ser acompanhado

nas Figuras 111 e 112. Neste caso, as vazões mínimas cresceram ao passo em que as vazões máximas decresceram. Um dos fatores associado a isto é o fato de que, nesta simulação, os maiores índices de mudança no uso do solo ocorreram para silvicultura, gerando regiões de reflorestamento. Como comentado na Seção 4.2.1, nesse tipo de situação, há uma diminuição na produção de água da região, gerando um decrescimento nas vazões.

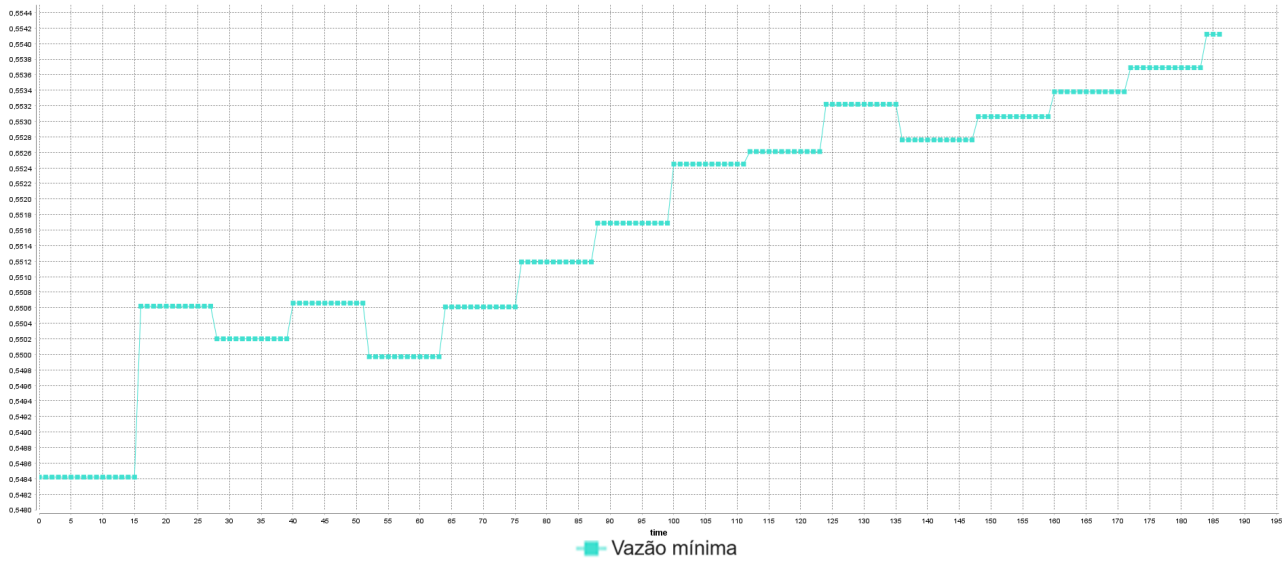


Figura 111: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

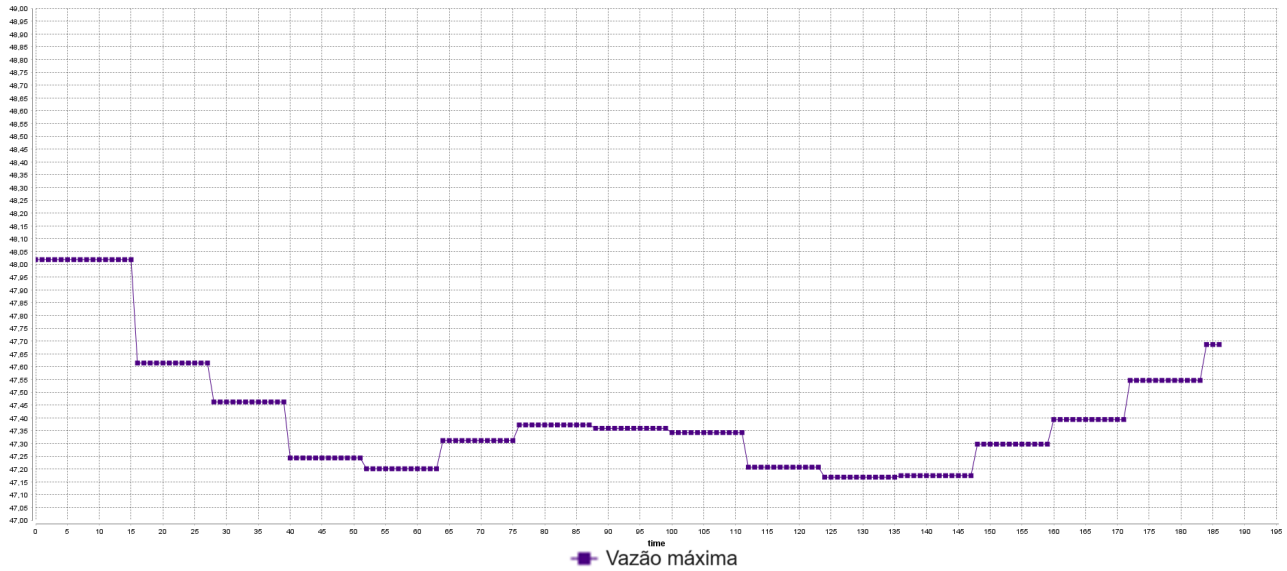


Figura 112: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 2 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

A mudança no uso do solo para a simulação 3, pode ser visualizada na Figura 113. Neste caso, pode-se observar que, assim como a simulação 7 do Cenário 2, considerando 20% de mudança no uso do solo, as maiores mudanças ocorreram para pastagem e silvicultura. Entretanto, as quantidades foram distintas. No início desta simulação, pastagem ocupava 22.38% e

finalizou com 25.80%, e silvicultura ocupava 4.31% e terminou ocupando 9.71% da região. Os usos do solo com maior prejuízo foram mata nativa e agricultura, chegando em 7.77% e 42.46% do ambiente, nessa ordem.

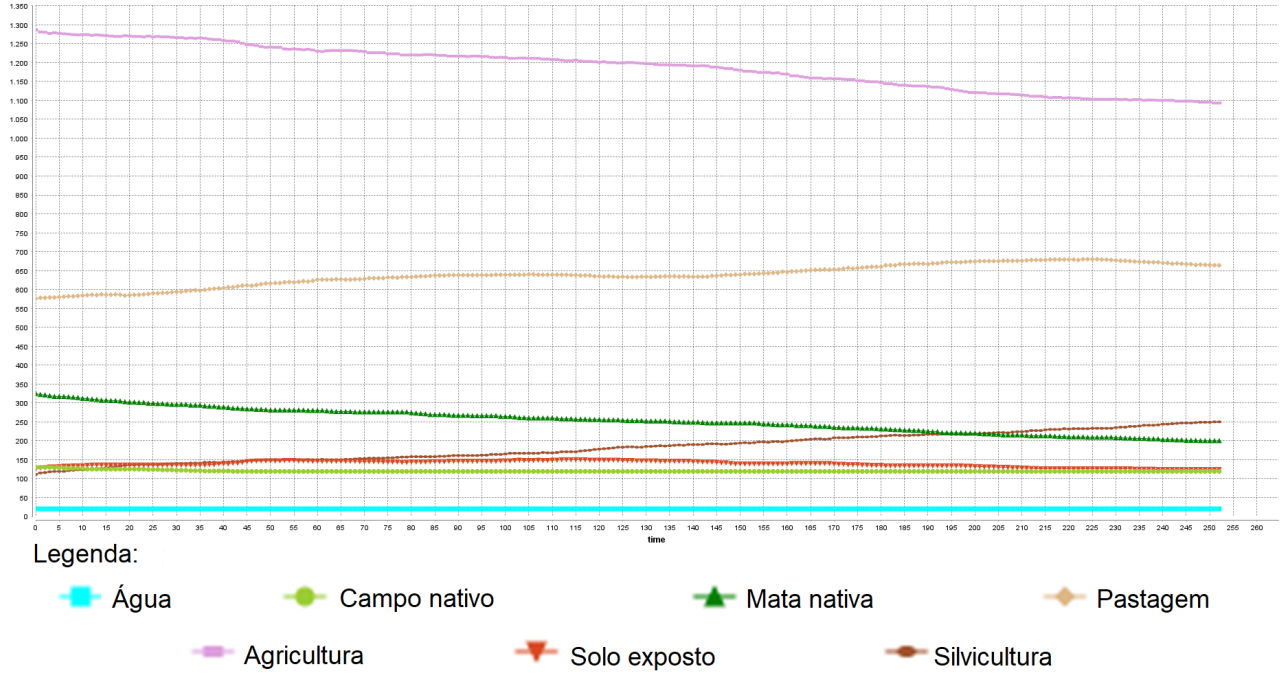


Figura 113: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 3, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

As Figuras 114 e 115 mostram a variação das vazões mínimas e máximas durante a simulação 3. Neste caso, percebe-se que as vazões mínimas apresentaram maior variabilidade, enquanto as vazões máximas permaneceram com baixa variação. Nesta simulação, as mudanças no uso do solo envolveram regiões de desmatamento e reflorestamento, o que influencia no comportamento das vazões máximas obtidas.

A Figura 116 mostra a variação da mudança no uso do solo ao longo da simulação 4. Neste caso, assim como na simulação anterior, as maiores mudanças foram para pastagem e silvicultura. Porém, ao final da simulação, esses usos do solo ocuparam cerca de 31.93% e 9.40%, respectivamente. Pode-se observar que pastagem cresceu de forma mais rápida ao longo desta simulação, gerando uma mudança mais relevante se comparada à simulação anterior. Além disso, os maiores impactos variaram entre regiões de campo nativo, mata nativa e agricultura, chegando a 3.03%, 10.10% e 40.21% do ambiente, respectivamente. Além disso, percebe-se que a quantidade de células de silvicultura não ultrapassa a de mata nativa, mas os valores chegam em números próximos.

Nas Figuras 117 e 118 tem-se a mudança das vazões mínimas e máximas ao longo da simulação 4. Nesta simulação, as vazões mínimas apresentaram um comportamento com pouca variação. Já as vazões máximas decresceram ao longo dos ciclos. Um dos motivos para que isso ocorra pode estar associado a mudança no uso do solo para silvicultura, da qual está vinculada ao reflorestamento.

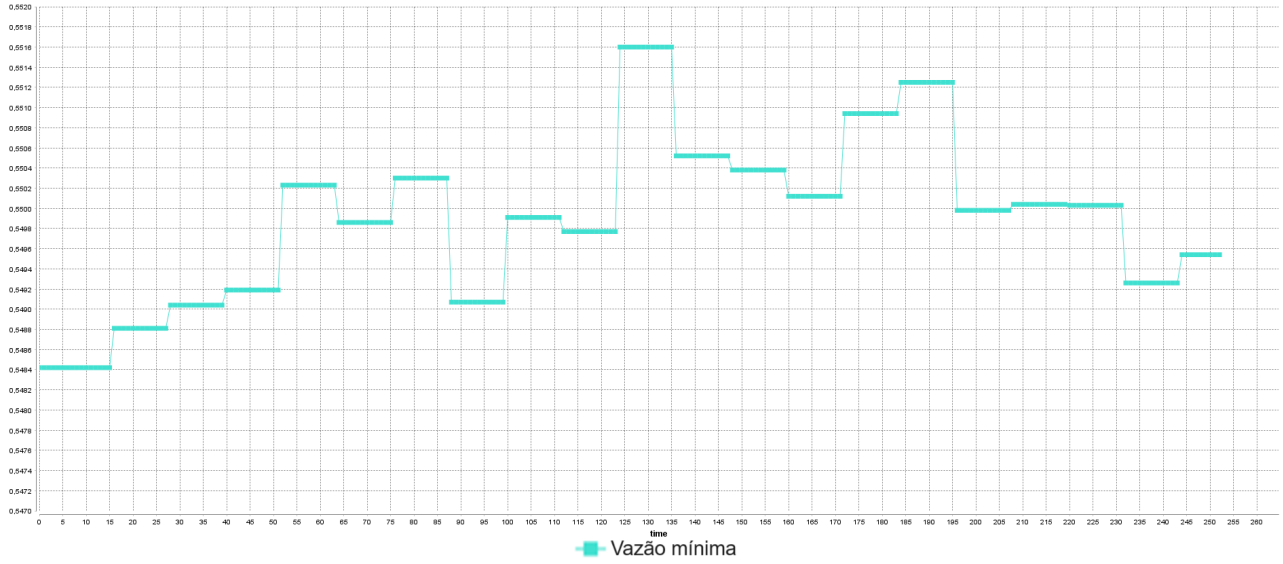


Figura 114: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

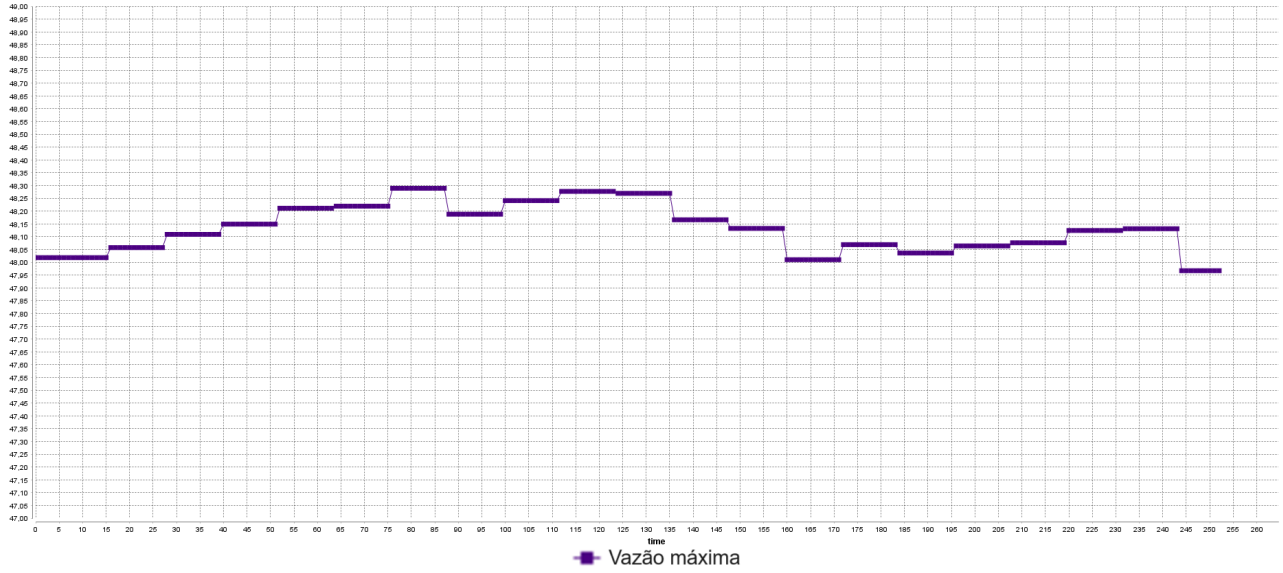


Figura 115: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 3 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

Na Figura 119 tem-se o comportamento da mudança no uso do solo, da simulação 5. Neste caso, as maiores modificações ocorreram para solo exposto, alcançando 9.67%, silvicultura, chegando em 5.28%, e pastagem, ocupando 23.08% do ambiente ao final da simulação. As regiões mais impactadas foram campo nativo, mata nativa e agricultura, onde diminuíram para 3.92%, 8.43% e 47.44% do ambiente, respectivamente. Percebe-se que durante esta simulação, o decrescimento da agricultura é lento e há momentos de recuperação parcial.

Os comportamentos das vazões mínimas e máximas da simulação 5 são apresentados nas Figuras 120 e 121. Nesta simulação, o uso do solo com maior índice de mudança foi solo exposto. Além disso, houve um decrescimento maior em regiões de mata nativa. Dessa forma,

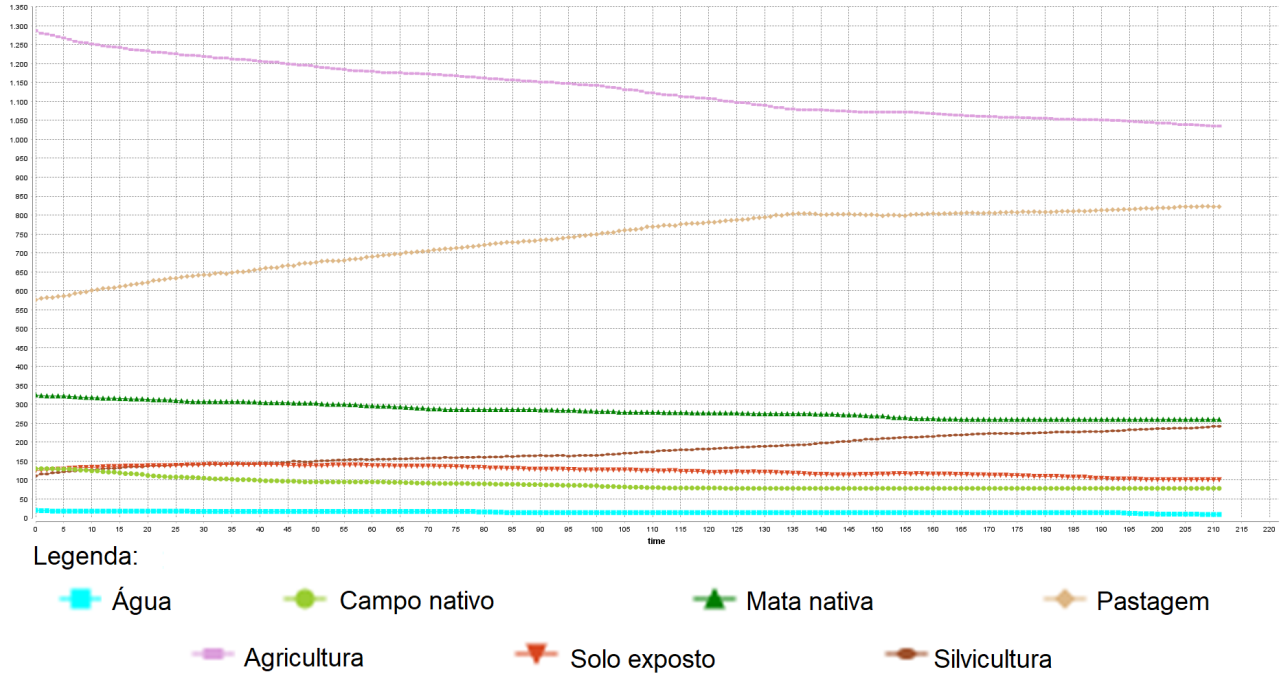


Figura 116: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 4, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

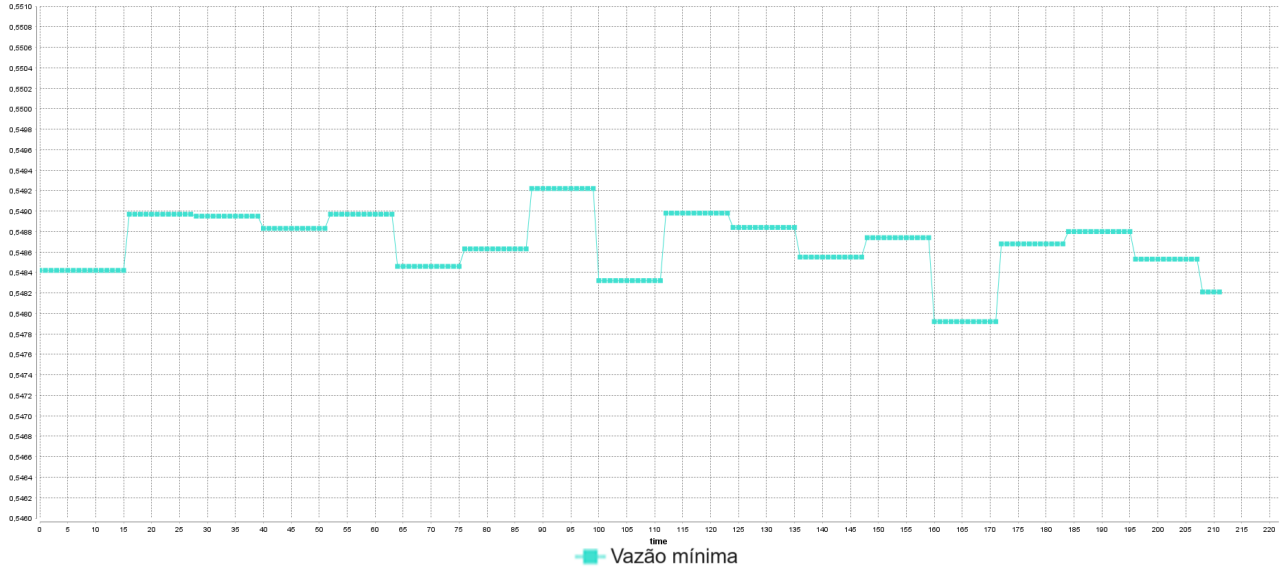


Figura 117: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

nessa configuração, as vazões mínimas e máxima apresentaram comportamento crescente ao longo dos ciclos. E ainda, quanto a quantidade de células com solo exposto ultrapassa aquelas com mata nativa, tem-se os picos para as vazões máximas e mínimas.

A Figura 122 apresenta a mudança no uso do solo ao longo da simulação 6. Para esta simulação, as maiores alterações foram realizadas para agricultura e silvicultura, onde alcançaram 51.36% e 8% da região, respectivamente. Os usos do solo que sofreram maior impacto foram campo nativo, mata nativa e pastagem, onde chegaram em 3.46%, 9.21% e 21.13% do ambi-

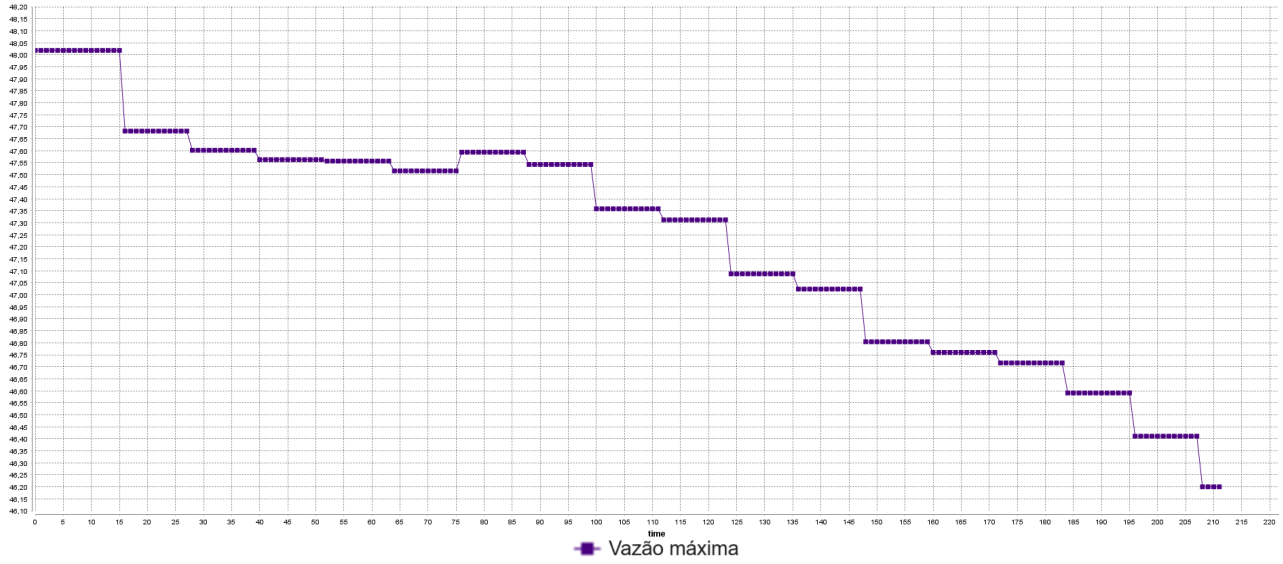


Figura 118: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 4 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

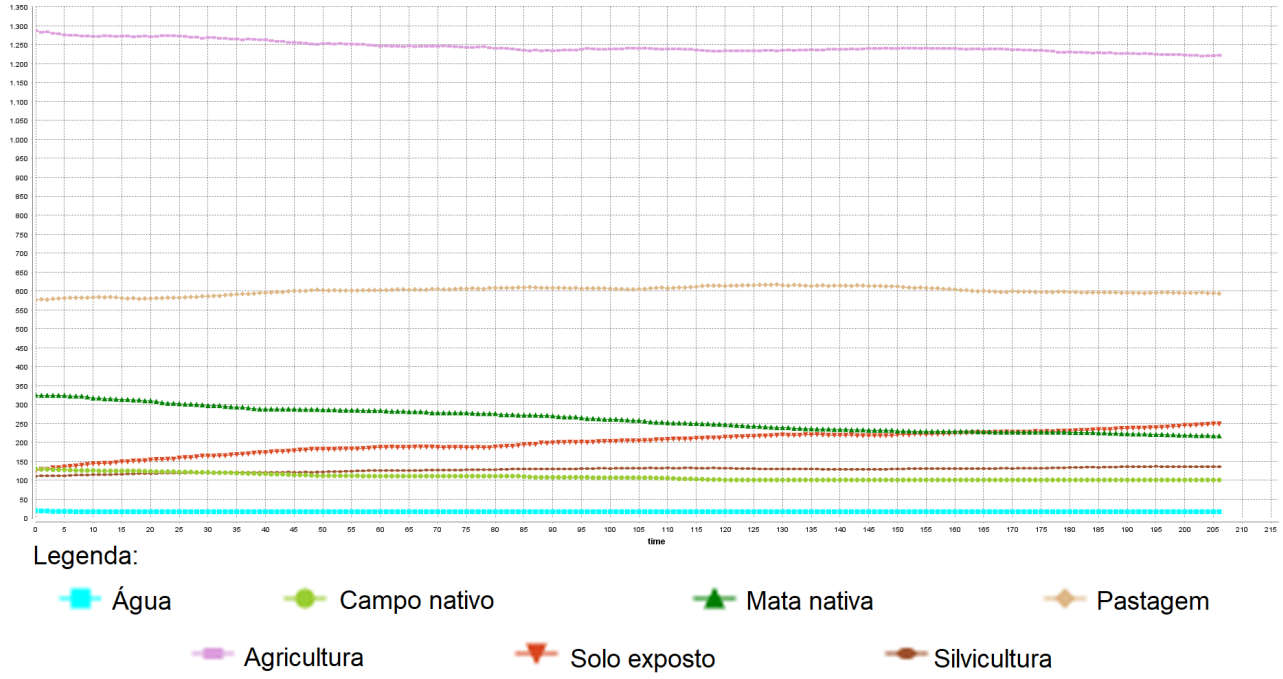


Figura 119: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 5, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

ente, nessa ordem. Percebe-se que esta simulação gerou mudanças mais lentas, se comparadas as simulações anteriores. Isso fez com que esta fosse a simulação com maior quantidade de ciclos (271, ou ainda, 22,6 anos).

As variações nas vazões mínimas e máximas, da simulação 6, podem ser visualizadas nas Figuras 123 e 124. Neste caso, as vazões máximas apresentaram maior variação, onde seu comportamento se mostrou crescente, na maior parte da simulação. Esta simulação teve como principal mudança no uso do solo a silvicultura. Entretanto, as regiões mais afetadas envolveram

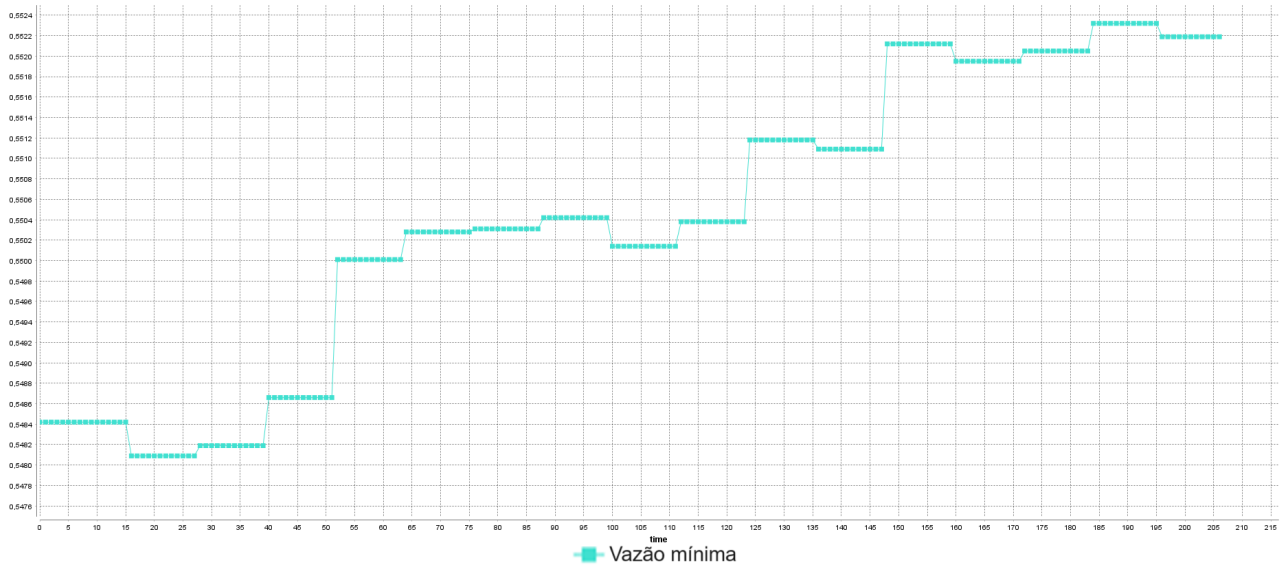


Figura 120: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

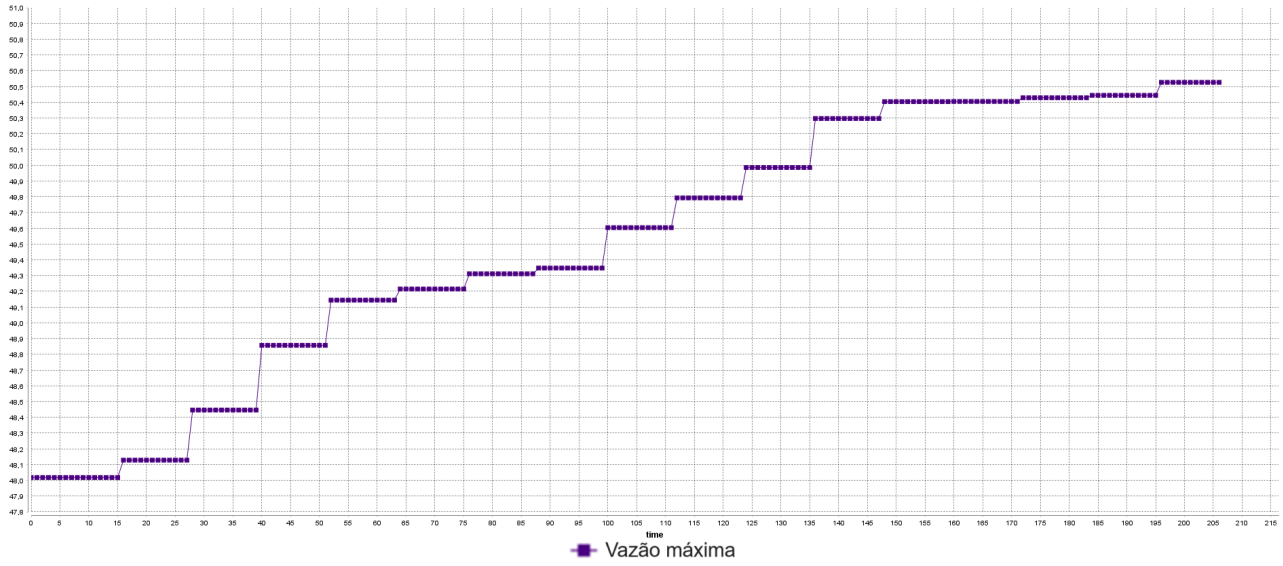


Figura 121: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 5 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

campo nativo e mata nativa. Neste caso, os índices de desmatamento podem influenciar no aumento das vazões máximas.

O comportamento da mudança no uso do solo na simulação 7 pode ser visualizado na Figura 125. Esta simulação apresenta algumas similaridades com a simulação 4 do Cenário 2, com 20% de mudança no uso do solo. Entretanto, neste caso, as maiores mudanças ocorreram para pastagem, solo exposto e silvicultura. Esses usos do solo inciaram a simulação com 22.38%, 4.86% e 4.31% do ambiente, e finalizaram com 28.90%, 10.53% e 5.94% de ocupação da região, respectivamente. Os demais usos do solo sofreram perdas nesta simulação, sendo agricultura aquele que mais decresceu, chegando em 40.68% da região.

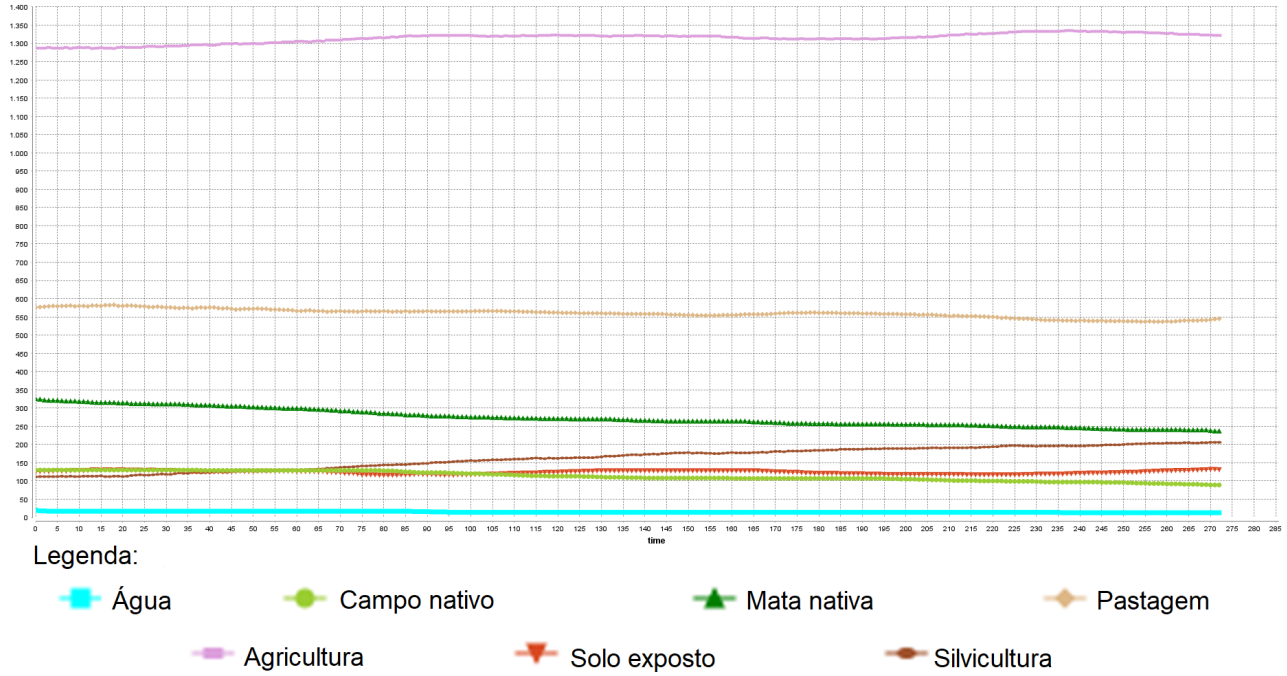


Figura 122: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 6, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

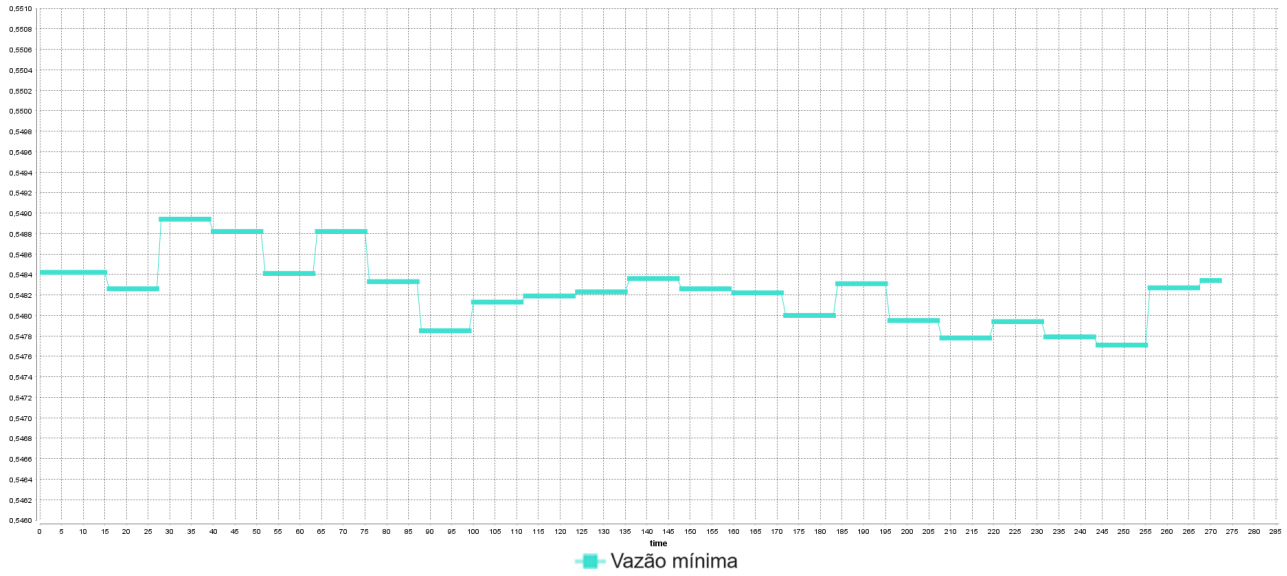


Figura 123: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

Nas Figuras 126 e 127 tem-se as vazões máximas e mínimas da simulação 7. Observa-se que as vazões apresentam comportamento crescente em ambos os casos. Nesta situação, o comportamento hidrológico do sistema pode estar associado ao fato de que as maiores mudanças são para solo exposto e pastagem. Dessa forma, há uma tendência de que quando há esse tipo de modificação no ambiente, as vazões crescem.

Com relação a simulação 8, tem-se a Figura 128 apresentando o comportamento da mudança no uso do solo da região. Visualmente, percebe-se que a mudança mais significativa ocorre para

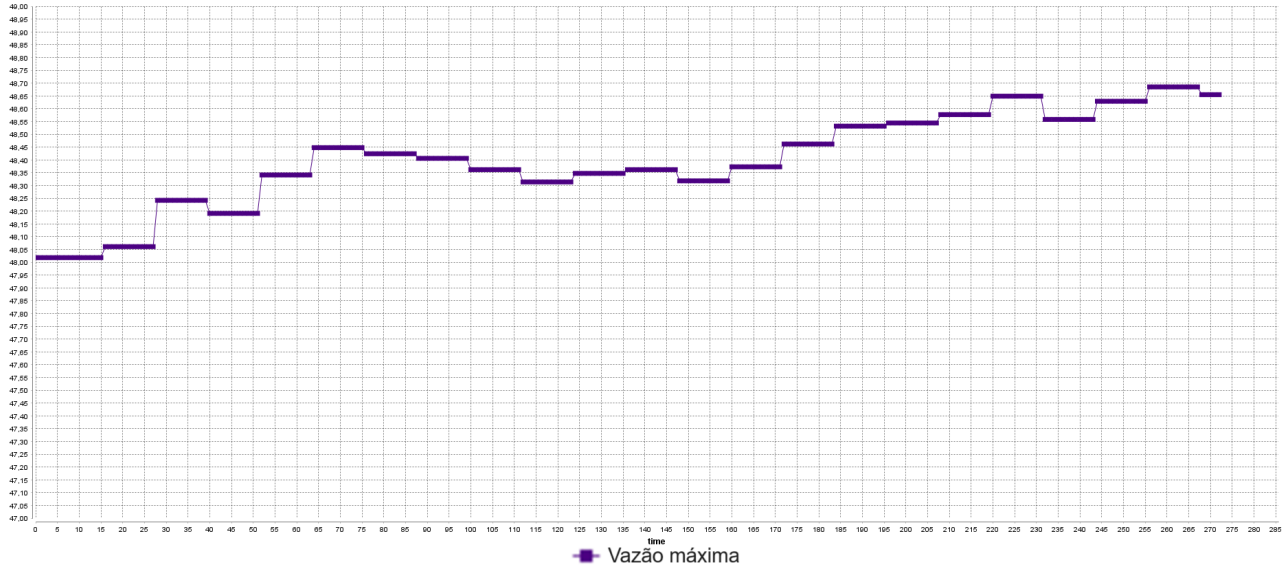


Figura 124: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 6 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

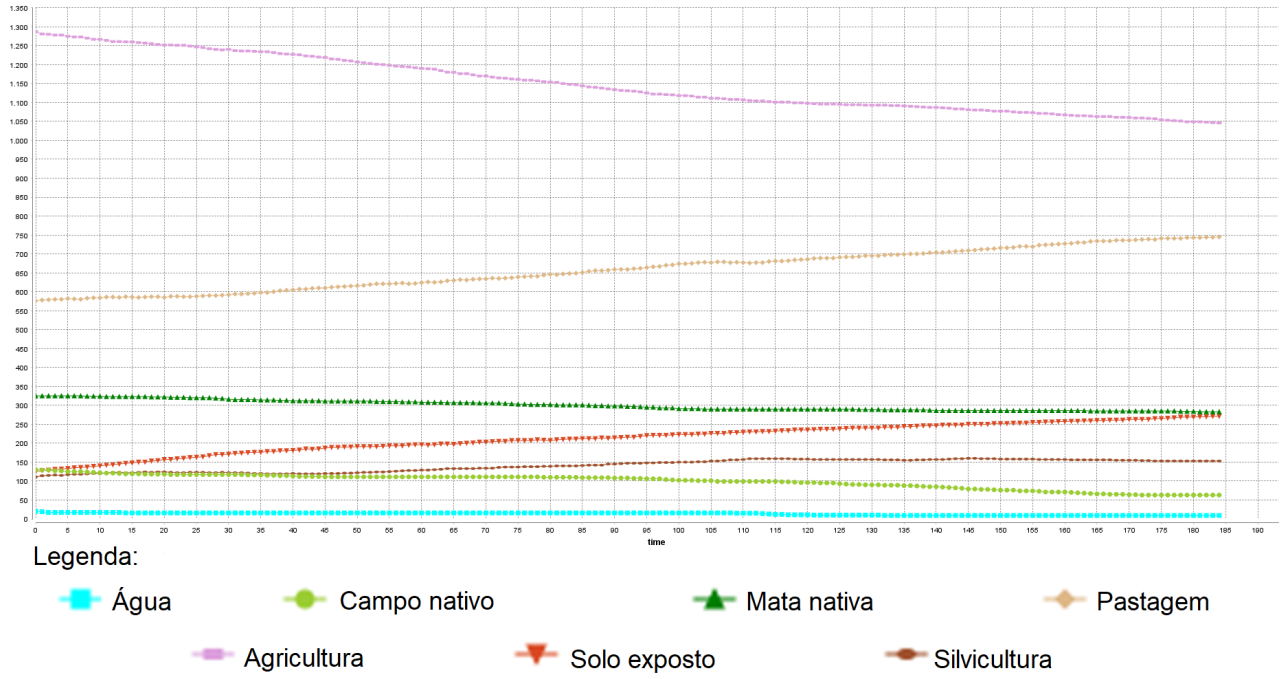


Figura 125: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 7, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

silvicultura, onde esse uso do solo alcança 15.85% do ambiente. Observa-se que antes da metade da simulação, a quantidade de células referente a silvicultura ultrapassa as de mata nativa. Os demais usos do solo decrescem na região durante a simulação. Porém, a agricultura é o que mais sofre impacto, chegando em 41.96% do ambiente.

As Figuras 129 e 130 apresentam as variações das vazões mínimas e máximas ao longo dos ciclos, na simulação 8. Percebe-se que as vazões mínimas apresentam variações significativas apenas no início da simulação, quando há mudanças mais rápidas ocorrendo no SMA. Já as

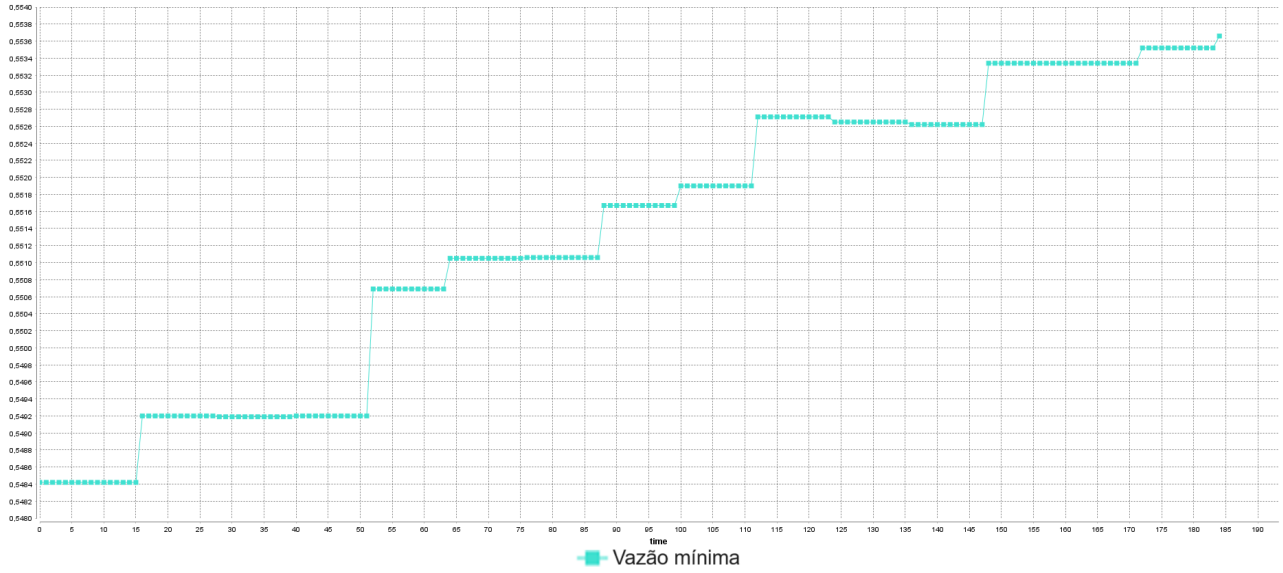


Figura 126: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

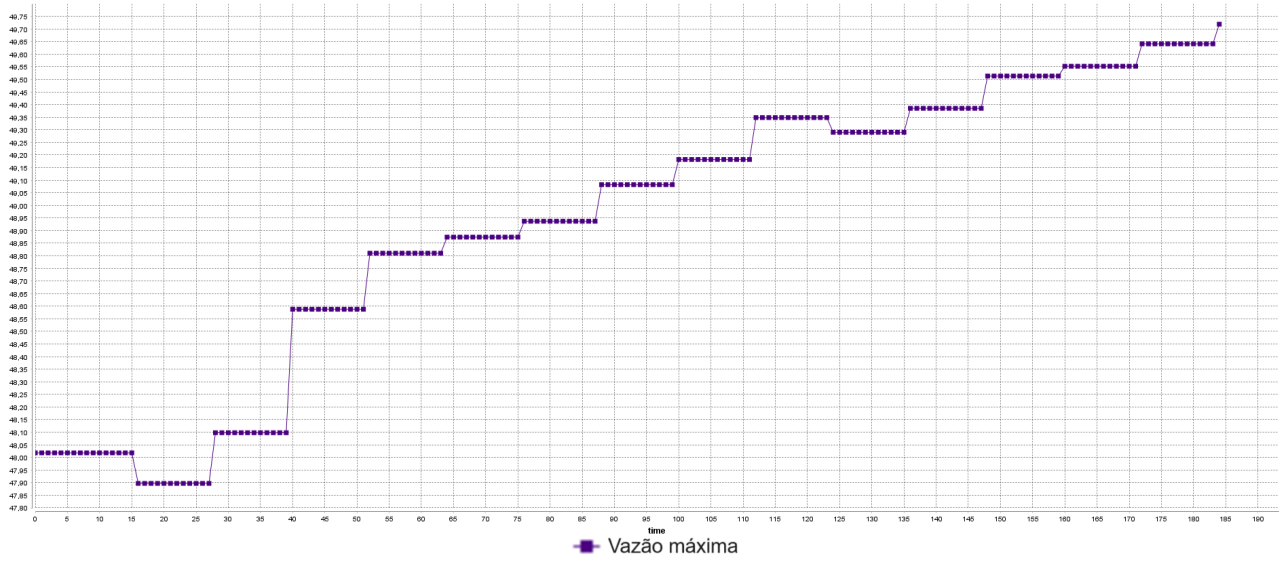


Figura 127: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 7 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

vazões máximas decrescem ao longo de toda a simulação. Um dos fatores que interfere diretamente neste resultado está associado a mudança no uso do solo para silvicultura, da qual cresce durante todo o período simulado. Além disso, a mudança no uso do solo para para silvicultura é a maior realizada no ambiente.

O comportamento da mudança no uso do solo da simulação 9 pode ser visualizado na Figura 131. Neste caso, percebe-se que as modificações mais importantes ocorreram para agricultura e silvicultura, onde chegaram em 57.46% e 8.47%, respectivamente. Os demais usos do solo tem suas regiões afetadas, sendo mata nativa e pastagem os mais impactados. De fato, esses usos decrescem, e passam a ocupar 9.44% e 16.08% da região, nessa ordem.

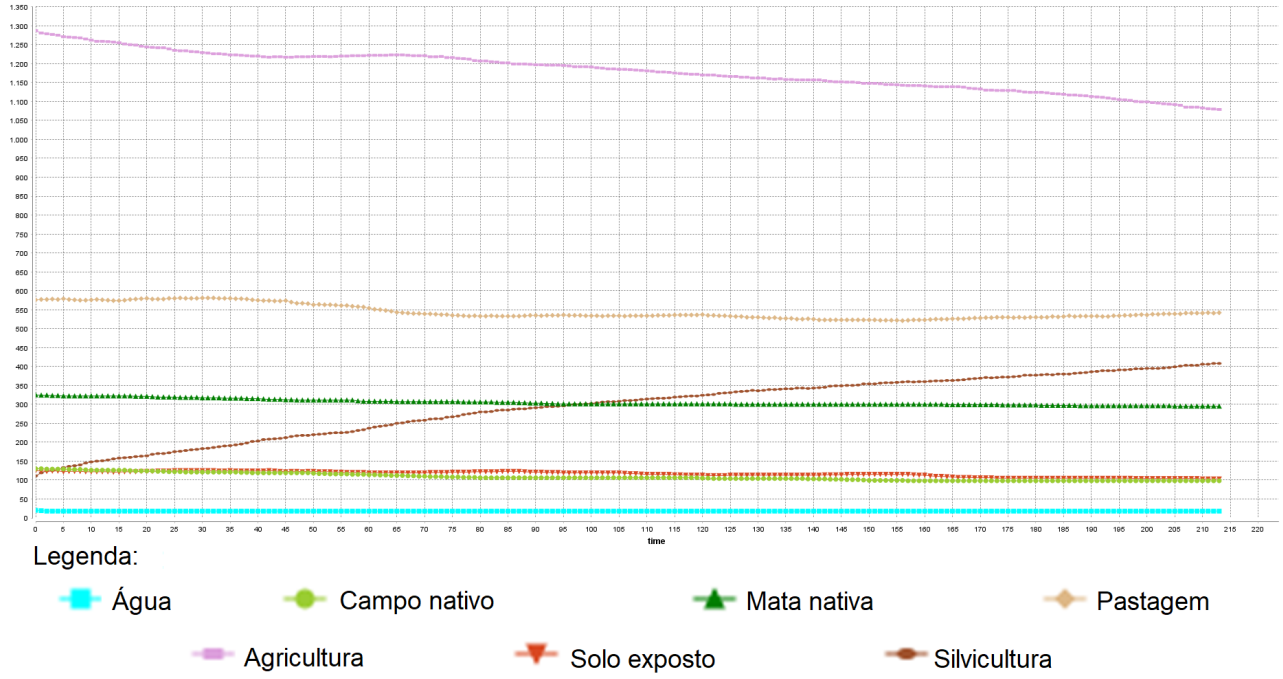


Figura 128: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 8, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

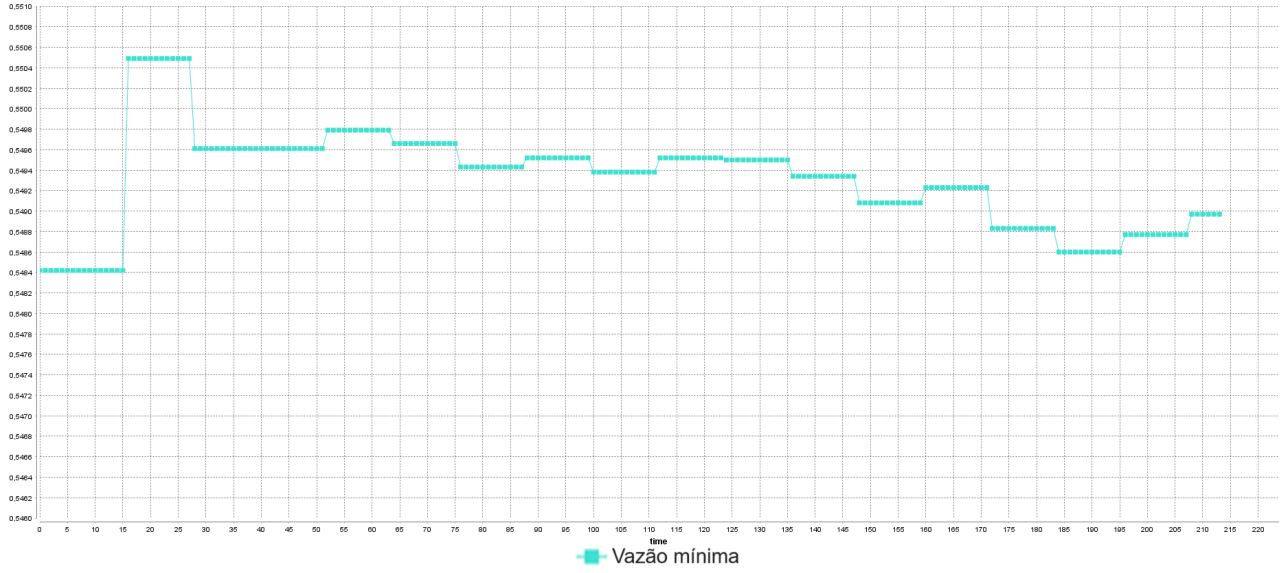


Figura 129: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

Os comportamentos referentes as vazões mínimas e máximas da simulação 9 podem ser observados nas Figuras 132 e 133. Como já mencionado, esta simulação apresentou as principais mudanças para agricultura e silvicultura. Por outro lado, pastagem, mata nativa e campo nativo foram regiões que mais sofreram impacto com as modificações ocorridas. Diante disso, as vazões indicaram um equilíbrio, isto é, não apresentam decrescimento ou crescimento em seu comportamento.

A Figura 134 apresenta a mudança no uso do solo da simulação 10, a última do Cenário

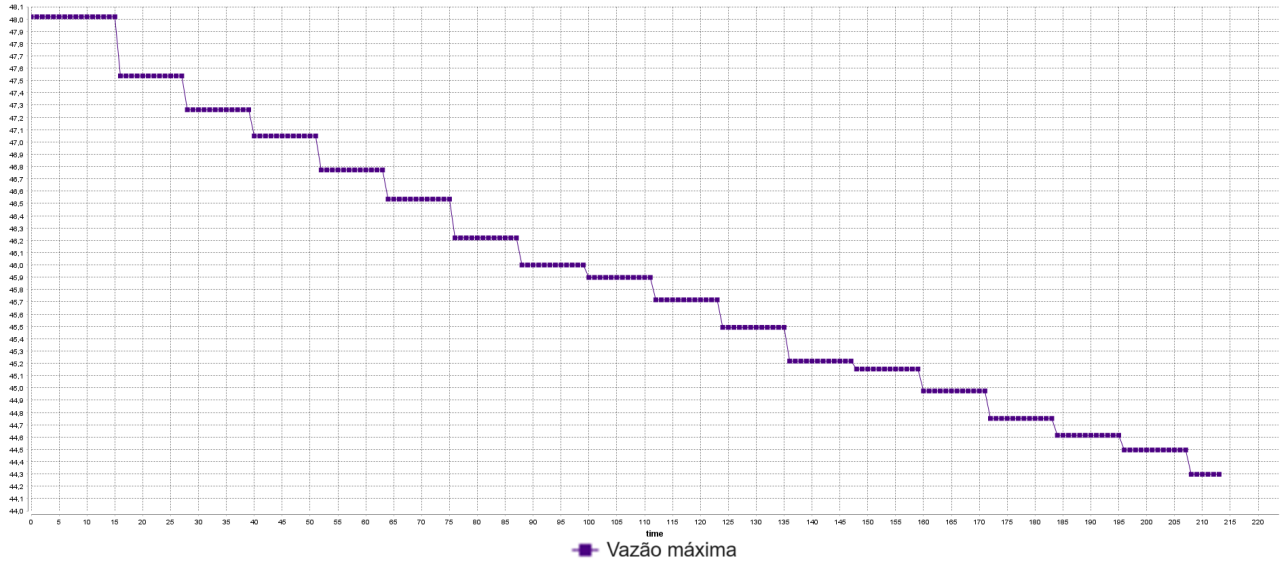


Figura 130: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 8 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

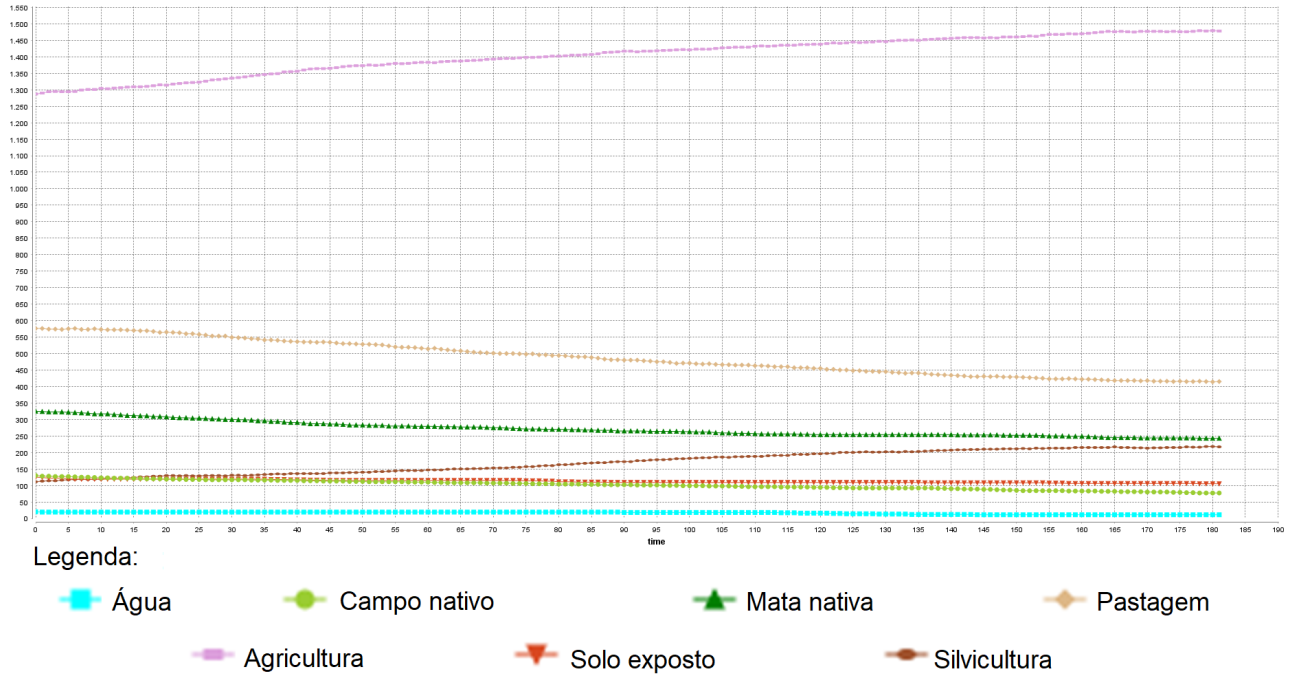


Figura 131: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 9, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

3. Nesta simulação, as maiores mudanças ocorreram para solo exposto e silvicultura, em que esses usos atingiram 6.76% e 8.74% de ocupação no ambiente. Visualmente, percebe-se que o crescimento de silvicultura foi um pouco mais rápido do que de solo exposto. Por outro lado, mata nativa e agricultura foram os usos do solo mais prejudicados, chegando em 7.81% e 47.01%, nessa ordem.

As Figuras 135 e 136 mostram as variações das vazões mínimas e máximas da simulação 10, ao longo dos ciclos. Neste caso, pode-se observar que as vazões foram crescentes, em quase todos

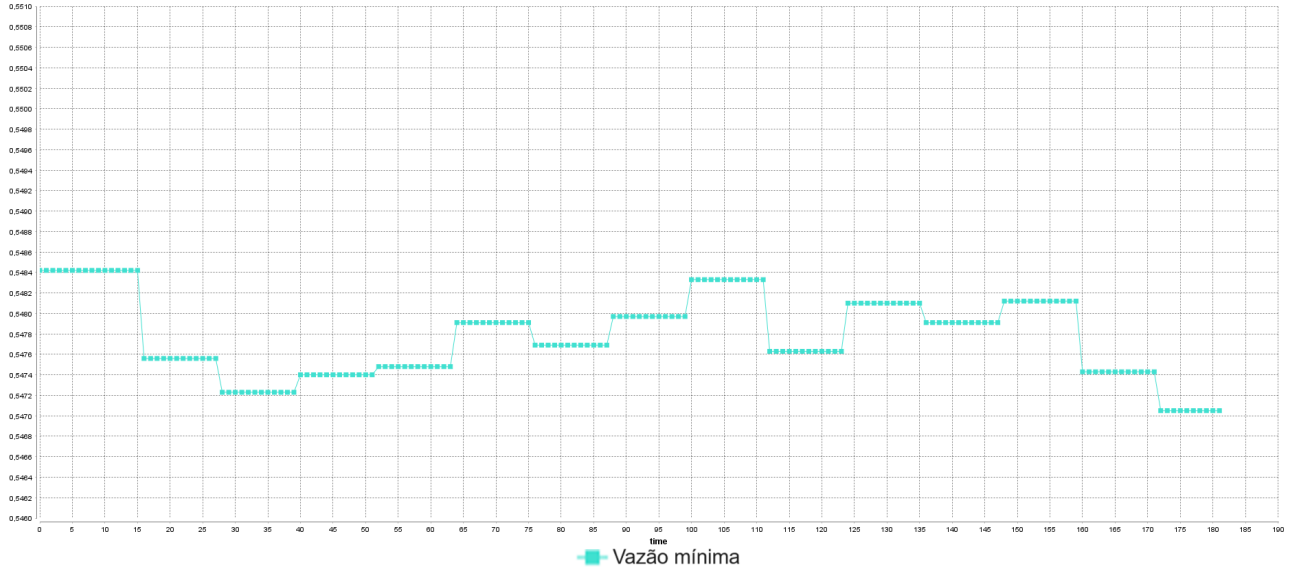


Figura 132: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

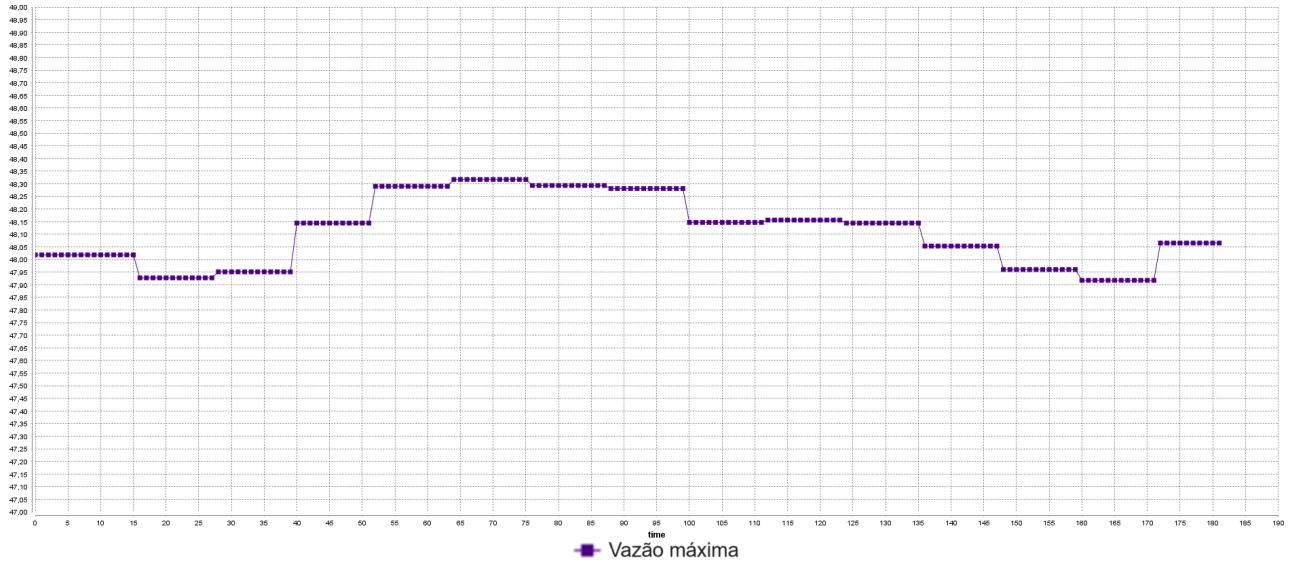


Figura 133: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 9 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

os períodos simulados. Percebe-se que o aumento de silvicultura interferiu no comportamento hidrológico. Entretanto, a mudança para solo exposto, atrelado ao decrescimento de regiões de mata nativa influenciaram no aumento das vazões máximas. Esses são alguns fatores que podem estar envolvidos nos resultados apresentados nesta simulação.

As simulações apresentadas nessa seção geraram as mudanças no uso do solo no SMA, e as respectivas vazões mínimas e máximas simuladas no modelo LASH. Os resultados indicam que o modelo acoplado descreveu o comportamento hidrológico do sistema, gerando respostas a partir da atualização dos atributos dos parâmetros do uso do solo.

Neste Cenário, assim como nos demais, buscou-se uma interpretação sobre os resultados das

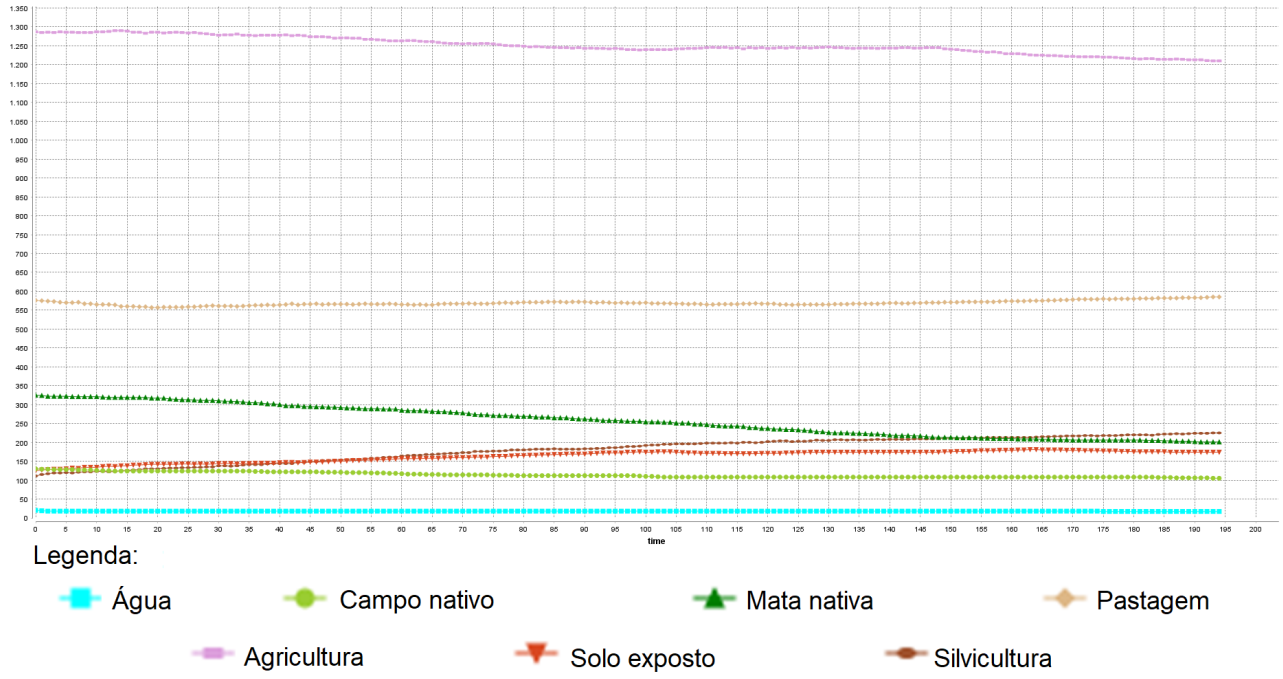


Figura 134: Quantidade de células do ambiente do SMA por uso do solo ao longo da simulação 10, do cenário 3, considerando 20% de mudança total do ambiente.

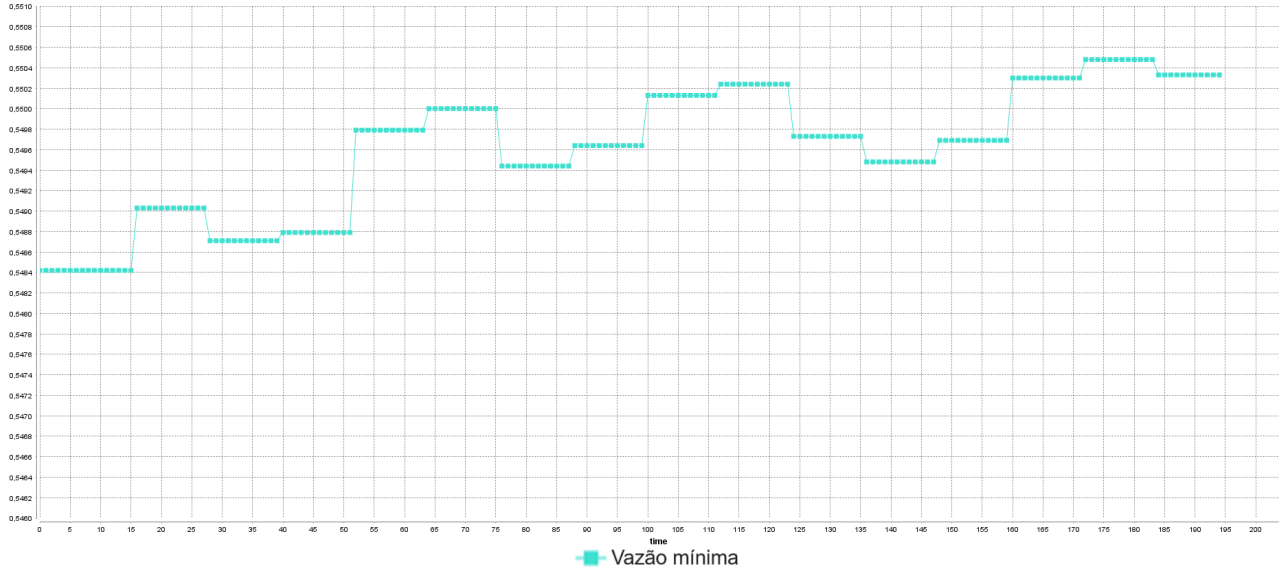


Figura 135: Vazões mínimas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

vazões, a partir das mudanças no uso do solo obtidas. Entretanto, salienta-se que, neste trabalho, o objetivo principal foi obter uma ferramenta de modelagem acoplada sócio-hidrológica. Nesse sentido, é indicado que investigações mais profundas sejam realizadas em casos de estudos específicos envolvendo mudança no uso do solo.

As Figuras 137, 138 e 139 mostram os valores obtidos para as vazões mínima, média e máxima anual, do último ano simulado em cada caso do Cenário 3. Observa-se que, com relação as vazões mínimas anuais, os maiores valores foram atingidos pela simulação 2, enquanto os

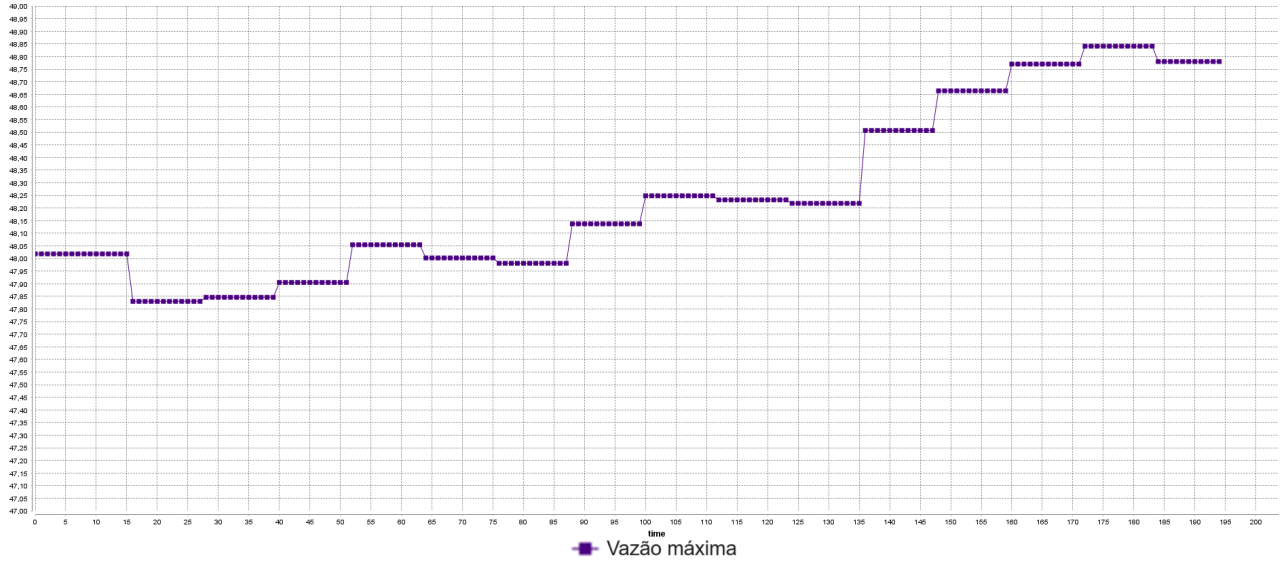


Figura 136: Vazões máximas estimadas através do modelo LASH na simulação 10 do SMA, do cenário 3 com 20% de mudança do uso do solo.

menores valores pela simulação 4. No que se refere as vazões médias e máximas anuais, as simulações 5 e 8 geraram os menores e maiores valores em ambos os casos, respectivamente.

Em comparação ao Cenário 2, com 20% de mudança no ambiente, pode-se observar que o Cenário 3 apresentou vazões com maiores variações. No Cenário 2 os gestores estavam limitados a modificar o ambiente a partir das tendências definidas, logo algumas mudanças não ocorreram no ambiente. Já no Cenário 3, as mudanças no uso do solo foram mais variadas.

Além disso, as regiões em que os gestores modificaram o uso do solo impactou o ambiente de forma diferente em cada simulação, gerando resultados distintos nas vazões. No Cenário 2, os gestores eram limitados a modificar o ambiente em sub-bacias específicas, gerando impactos semelhantes. Já no Cenário 3 não houve essa limitação.

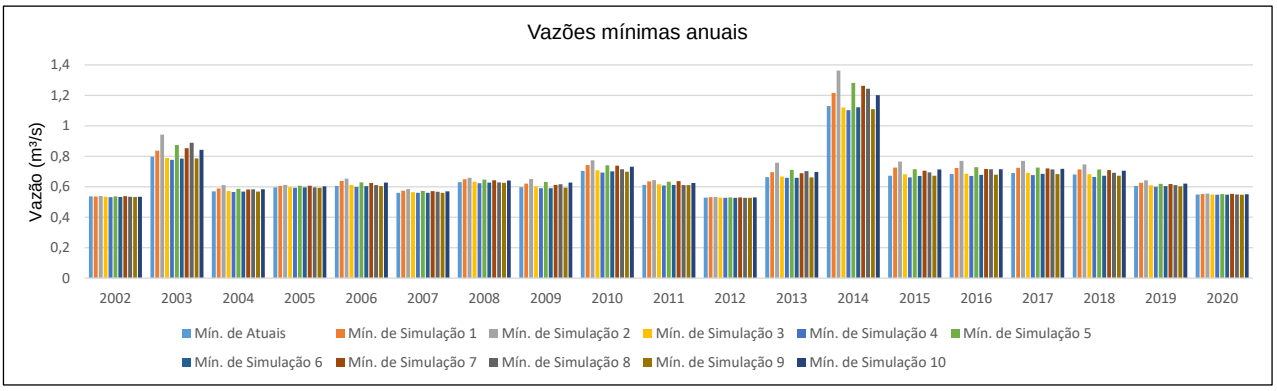


Figura 137: Vazões mínimas anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Com relação ao sistema social desenvolvido através do SMA, serão comentados os resultados referentes as tentativas de mudança no uso do solo, e as negociações entre os gestores. A Tabela 33 descreve as tentativas totais, e o total de células modificadas, ao final de cada simulação do

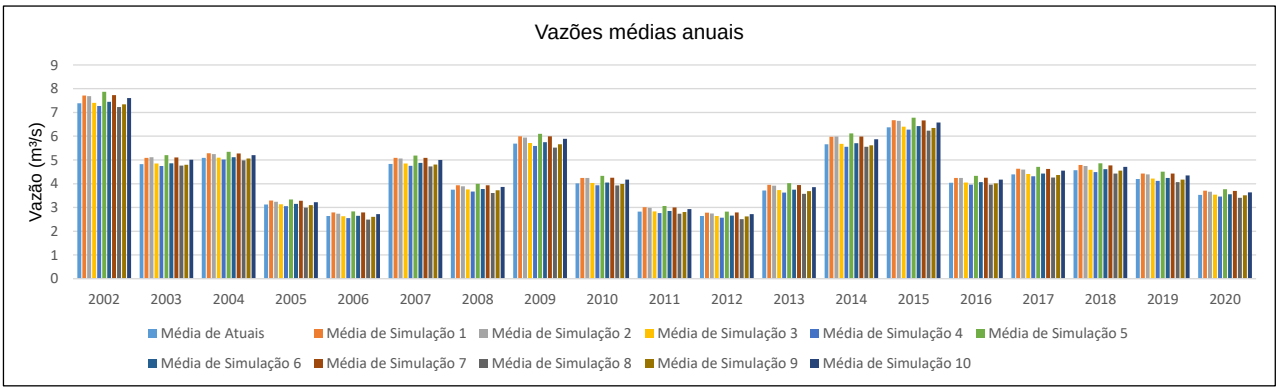


Figura 138: Vazões médias anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

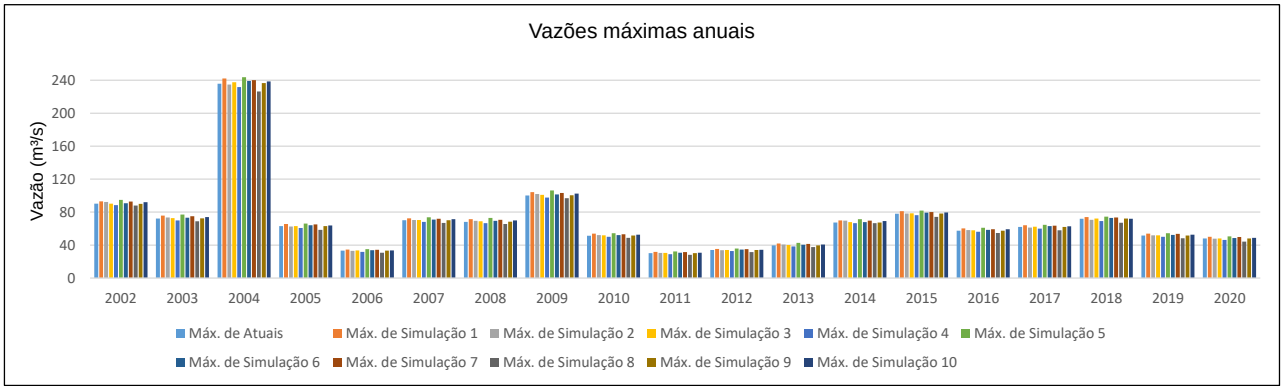


Figura 139: Vazões máximas anuais, para cada simulação do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Cenário 3. Neste caso, considerou-se $E_P < 5\%$ (Erro Percentual - Equação 3.48), para se obter um controle na mudança no uso do solo.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Tentativas	1140	1536	1240	1086	1108	1092	1230	1092	1084	1146
Células modificadas	516	516	516	516	515	515	515	515	515	516

Tabela 33: Tentativas de mudança no uso do solo em cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Dessa forma, pode-se observar que o controle gerou bons resultados para as previsões. Isso indica que as simulações poderiam ter sido ainda mais rápidas, e com ainda mais variações nas mudanças no uso do solo do que os resultados apresentaram. Nesse sentido, os impactos hidrológicos seriam maiores se comparados aos resultados obtidos. Dessa forma, percebe-se a importância em se estabelecer um limite na variação da mudança no uso do solo.

Com relação as negociações entre os gestores, tem-se a Tabela 34, da qual indica as quantidades de tentativas de compras de lotes, bem como as compras negadas e concluídas em cada simulação. Pode-se observar que nas simulações 2 e 6 tem-se o menor e o maior número de tentativas, respectivamente. Entretanto, nas simulações 6 e 3 tem-se o menor e o maior número

de compras concluídas com sucesso, nessa ordem. Dessa forma, percebe-se que não há uma relação entre o número de tentativas e o número de lotes comprados. As diferenças principais estão nos valores referentes as porcentagens de compra e venda, e nos preços de venda e de compra de lotes, dos quais são definidos no início de cada simulação e que interferem nas etapas de negociação.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Tentativas	1442	1160	2146	1607	1589	2601	1258	1750	1185	1313
Negadas	1061	728	1661	1269	1150	2317	951	1400	778	913
Concluídas	381	432	485	338	439	284	307	350	407	400

Tabela 34: Tentativas de compras de lotes em cada simulação (S) do cenário 3, com 20% de mudança do uso do solo no ambiente.

Para visualizar a variação da quantidade de lotes e do saldo dos gestores, em cada simulação, tem-se as Figuras 140 e 141. Percebe-se que o saldo de cada gestor apresentou um comportamento similar ao apresentado no Cenário 2. Dessa forma, o gestor que iniciou a simulação com um número maior de células, e com maior produção, teve seu saldo crescente, com uma taxa de crescimento superior aos demais. A medida que o número de células ou que a produção é menor, o saldo cresce com uma taxa de crescimento menor.

Este Capítulo apresentou os principais resultados referentes ao modelo sócio-hidrológico proposto, diante de três cenários de mudança no uso do solo. No próximo Capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho.

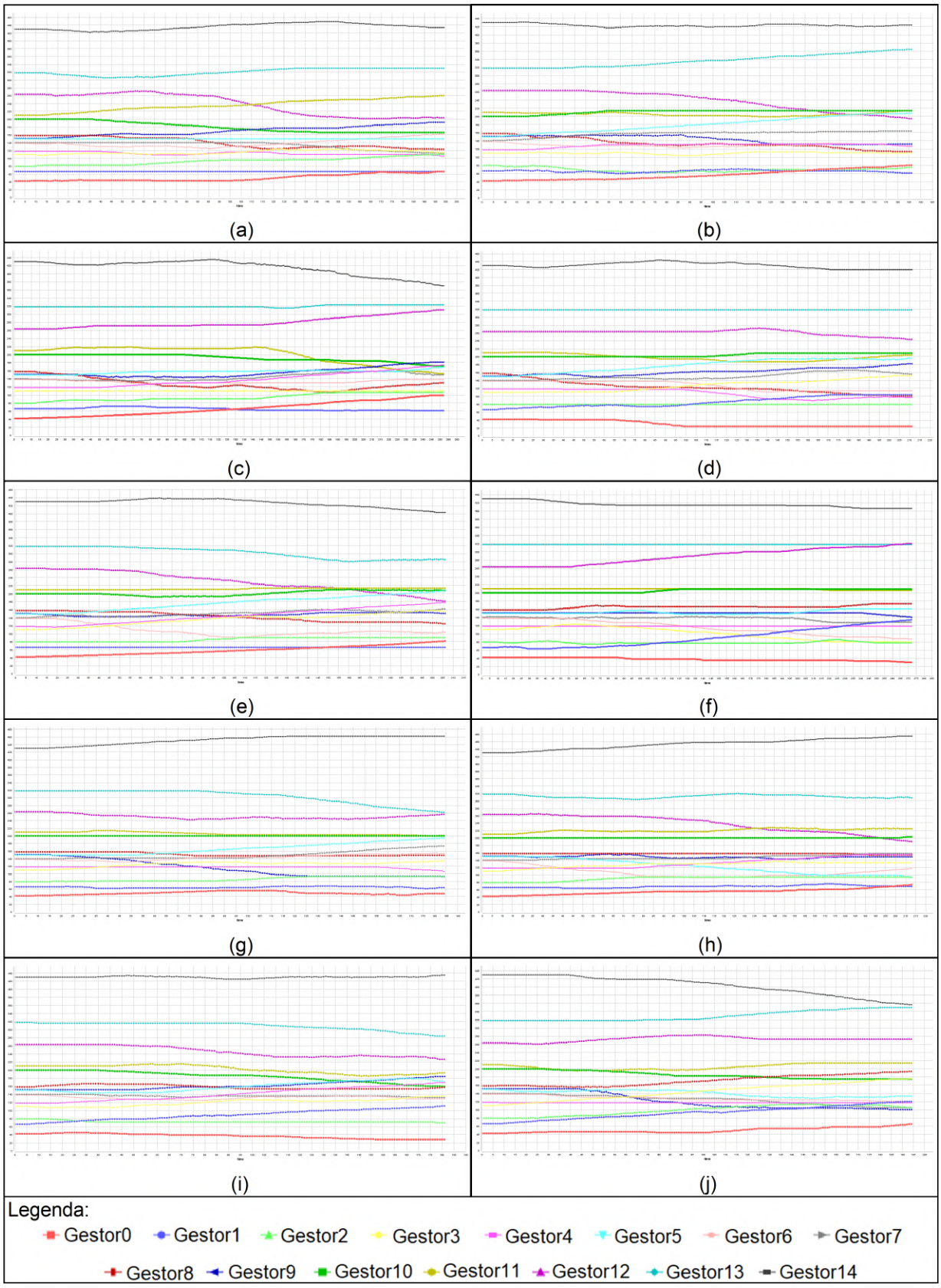


Figura 140: Quantidade de lotes mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 3, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

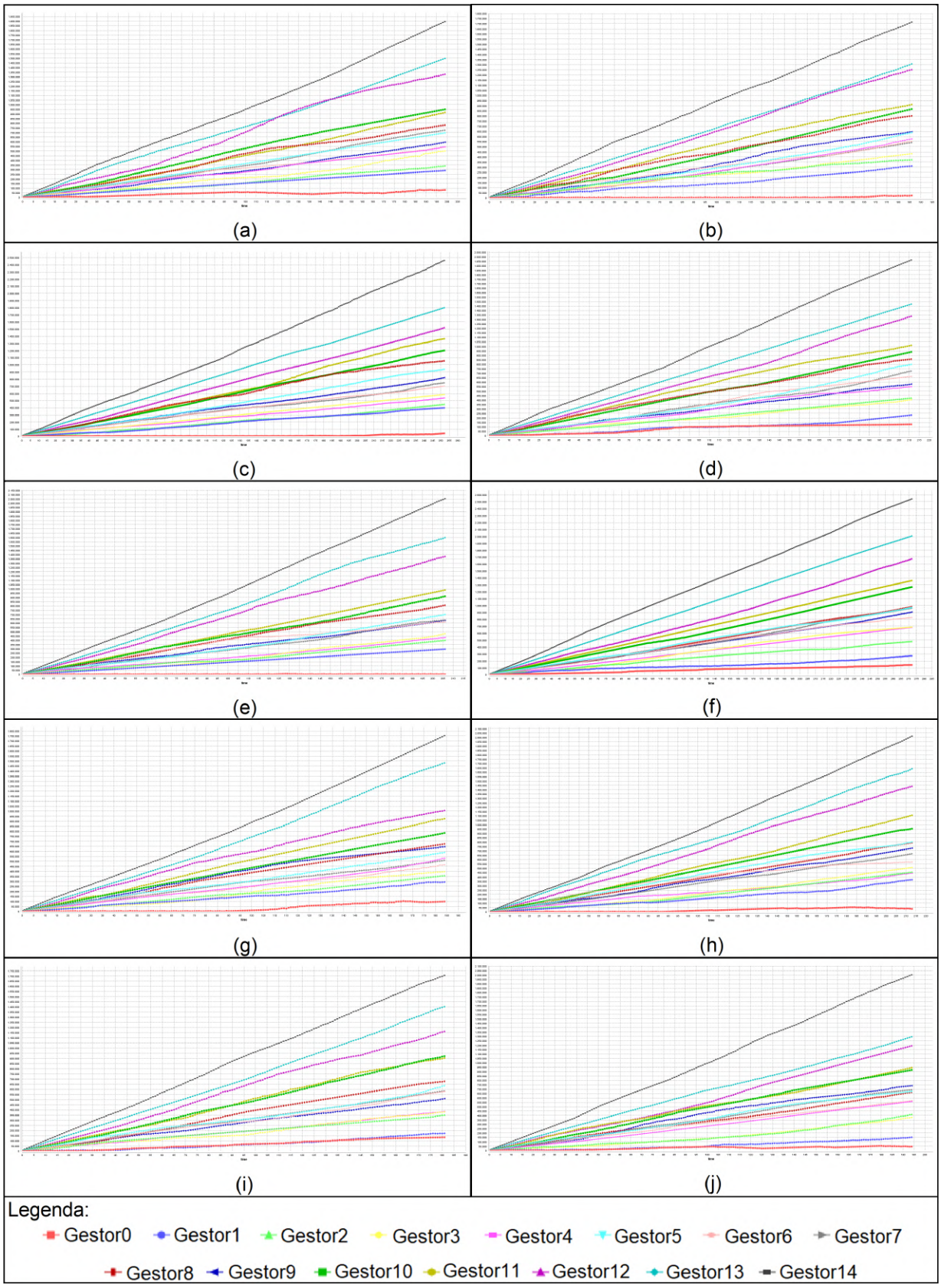


Figura 141: Saldo mensal por gestor ao longo dos ciclos do cenário 3, com 20% de mudança no uso do solo, na simulação: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; e (j) 10.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o processo de formalização, desenvolvimento e aplicação de um modelo acoplado sócio-hidrológico na região da bacia hidrográfica do Arroio Fragata, visando contribuir com o Projeto GPRH. Para isso, realizou-se uma busca sobre essa abordagem na literatura. A partir disso, foram definidos o modelo social com base em um SMA, e um modelo hidrológico a partir do modelo LASH. Três Cenários foram determinados para gerar a análise dos resultados.

O embasamento teórico sobre SMA e MCV foi exposto no Capítulo 2. Uma revisão sistemática da literatura foi apresentada com o intuito de identificar e explorar os principais trabalhos relacionados ao tema de pesquisa aqui proposto. A revisão mostrou que dentre 6 bases bibliográficas da literatura, apenas 3 trabalhos abordaram o uso conjunto de SMA e MCV no contexto de problemas hidrológicos. Além disso, os principais processos e desafios, ao acoplar essas ferramentas, foram identificados e comentados.

A metodologia e os materiais utilizados no trabalho foram apresentados no Capítulo 3. Dessa forma, a região da BHAF foi apresentada, bem como as bases de dados temporais e espaciais necessárias para o desenvolvimento da modelagem hidrológica. Além disso, o formalismo do modelo hidrológico LASH foi descrito. E ainda, apresentou-se o processo de desenvolvimento do SMA, considerando seu ambiente, os agentes, suas regras e ações. Ao final do Capítulo, foram determinados os processos de acoplamento do modelo sócio-hidrológico utilizando SMA e MCV LASH.

No Capítulo 4, tem-se os resultados deste trabalho. Primeiramente, foram abordadas a calibração e a validação do modelo LASH, das quais geraram bons resultados. Após foram explorados os Cenários 1, 2 e 3, referentes à mudança no uso do solo considerando critérios de parada distintos, ou a mudança segundo as tendências. Os resultados indicaram menores variações para o Cenário 1, em que se determinou 10% de mudança total no ambiente, com influência das tendências. Já o Cenário 3 foi o que apresentou as maiores variações, tanto nos usos do solo como nas vazões. Neste caso, foi considerado 20% de mudança aleatória no ambiente.

Nos Cenários 2 e 3, alguns fatores influenciaram os resultados hidrológicos obtidos. As vazões foram simuladas na foz da bacia hidrográfica do Arroio Fragata, considerando um período de 19 anos. Em estudos futuros, pode-se considerar os valores para as vazões obtidas em cada sub-bacia como entrada para o SMA. Nesse aspecto, os critérios para mudança no uso do solo podem estar relacionados as características de cada sub-bacia. Além disso, outros períodos podem ser considerados para calibração e validação do modelo hidrológico, bem como para simulação das vazões.

O formalismo e desenvolvimento da modelagem acoplada foram concluídos através das etapas anteriores. Nesse sentido, pode-se concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados. A mudança no uso do solo ocorreu como esperado no SMA, e as vazões puderam ser simuladas

através do modelo LASH. O acoplamento do modelo ocorreu de forma precisa, como determinado, onde os atributos do uso do solo foram construídos no SMA a cada ano simulado, e atualizados no modelo LASH, gerando novas vazões. Entretanto, neste processo a simulação foi realizada de forma manual. Isto é, para que um sistema acessasse o arquivo atualizado do outro sistema, foi necessário o acompanhamento de cada etapa da simulação. Nesse sentido, em trabalhos futuros, espera-se que esse desafio possa ser superado e esse processo seja mais rápido.

O modelo social foi realizado a partir da negociação entre os gestores, da qual apresentou resultados interessantes. No início da simulação, os parâmetros referentes a porcentagem de compra e venda, e valor de compra e venda foram definidos para cada gestor. Os resultados variaram de acordo com os valores determinados. Caso os valores impedissem que os agentes negociassem os lotes, as compras não eram concluídas. Nesse sentido, foram realizadas outras mudanças no ambiente. Sem as negociações, a mudança poderia ocorrer sem problemas, em qualquer célula, de acordo com o Cenário. Além disso, o caminho que os agentes percorreram direcionou a mudança no uso do solo.

Futuramente, algumas modificações podem ser realizadas no SMA quanto as ações e características dos agentes. Pode-se inserir usuários de água, dos quais realizam atividades distintas e, consequentemente, serão gerados diferentes impactos no sistema hidrológico. Além disso, pode-se considerar regiões menores para cada gestor, e deslocamentos determinados a partir do objetivo de mudança do agente. Com relação ao ambiente do SMA, em trabalhos futuros pretende-se considerar valores variáveis para os hectares, dos quais estarão de acordo com a localização e uso do solo. E ainda, outros dados geográficos podem ser considerados, a partir de mapas que forneçam regiões específicas, como unidades de preservação e conservação do meio ambiente, e localização de açudes e reservatórios de água.

Com relação aos resultados apresentados, pode-se perceber que os gráficos facilitam a visualização das vazões a cada mudança no uso do solo no SMA. Além disso, pode-se visualizar a quantidade de lotes e o saldo dos gestores a cada ciclo simulado. Diante dos Cenários propostos, os resultados apresentaram impactos visíveis quanto às mudanças no uso do solo. Neste trabalho, o intuito não foi identificar o que gerou os impactos, mas mostrar que mesmo com poucas mudanças no sistema, existem perturbações nas vazões. E principalmente, o objetivo foi apresentar uma ferramenta sócio-hidrológica, da qual facilita a análise de previsão na mudança no uso do solo.

Futuramente, essa ferramenta pode ser aperfeiçoada em alguns aspectos. Como já mencionado, espera-se que a simulação possa ser realizada de forma automática. Além disso, pode-se estabelecer regras mais realistas para os agentes do SMA, de forma que se estabeleçam regras e critérios definidos diante de uma organização ou sociedade. O ambiente do SMA pode apresentar maior discretização na região, e os parâmetros do modelo podem ser modificados para outros cenários. Além disso, pode-se explorar outras regiões hidrográficas, com áreas maiores ou menores.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European hydrological system – systeme hydrologique europeen,"She", 2: structure of a physically-based, distributed modeling system. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.87, p.61—-77, 1986.

ADAMATTI, D. F. **Inserção de Jogadores Virtuais em Jogos de Papéis para Uso em Sistemas de Apoio a Decisão em Grupo**: um Experimento no Domínio da Gestão de Recursos Naturais. 2007. Doutorado em Engenharia Elétrica — Universidade de São Paulo.

ADAMATTI, D. F. An Overview of the MABS and RPG Techniques in Natural Resources Management. In: **2009 International Conference on Computer Engineering and Technology**. [S.l.: s.n.], 2009. v.2, p.538–542.

AGARWAL, N.; STEINMETZ, R. Sharing Economy: A Systematic Literature Review. **International Journal of Innovation and Technology Management**, [S.l.], v.16, p.17, 06 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; DIRK, R.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. [S.l.]: Rome: FAO, 1998. 300p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. [S.l.: s.n.], 1998. 300p.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. V. C. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, [S.l.], v.20, n.1, p.129–137, 2017.

AMOUROUX, E.; CHU, T.-Q.; BOUCHER, A.; DROGOUL, A. GAMA: An Environment for Implementing and Running Spatially Explicit Multi-agent Simulations. In: GHOSE, A.; GOVERNATORI, G.; SADANANDA, R. (Ed.). **Agent Computing and Multi-Agent Systems. PRIMA 2007. Lecture Notes in Computer Science**. [S.l.]: Heidelberg: Springer, 2009. v.5044, p.359–371.

ANA. Panorama das Águas. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, [S.l.], 2020. Acessado em 20 de julho de 2020. Online. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>.

ANA. Hidroweb: sistemas de informações hidrológicas. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, [S.l.], 2020. Acessado em 10 de abril de 2020. Online. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>.

ANDREW, R.; DYMOND, J. A distributed model of water balance in the Motueka catchment, New Zealand. **Environmental Modelling & Software**, [S.l.], v.22, n.10, p.1519–1528, 2007.

AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região sul do Rio Grande do Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. 2014. Doutorado em Agronomia — Universidade Federal de Pelotas.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, [S.l.], v.34, p.73–89, 1998.

BARROS, C. A. P. **Dinâmica dos escoamentos na modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. 2016. Doutorado em Ciência do Solo — Universidade Federal de Santa Maria.

BARTHEL, R.; JANISCH, S.; SCHWARZ, N.; TRIFKOVIC, A.; NICKEL, D.; SCHULZ, C.; MAUSER, W. An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. **Environmental Modelling and Software**, [S.l.], v.23, n.9, p.1095–1121, 2008.

BATHURST, J. C.; BIRKINSHAW, S. J.; CISNEROS, F.; FALLAS, J.; IROUMÉ, A.; ITURRASPE, R.; NOVILLO, M. G.; URCIUOLO, A.; ALVARADO, A.; COELLO, C.; HUBER, A.; MIRANDA, M.; RAMIREZ, M.; SARANDÓN, R. Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 2: Model analysis. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.400, n.3, p.292 – 304, 2011.

BELTRAME, L. F. S.; TUCCI, C. E. M.; SILVA, E. A.; GERMANO, A. O.; VILLANUEVA, A. O. N.; MENDIONDO, E. M.; BASTOS, M. A.; LOUZADA, J. A. S.; LEÃO, M. I.; RISSO, A. **Estudo para avaliação e gerenciamento da disponibilidade hídrica da Bacia da Lagoa Mirim**. [S.l.]: Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas-IPH/UFRGS., 1998. 128p. v.1.

BERGER, R.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; CANDEIAS, A. L. B.; RUBILAR, R. Índices de vegetação para a estimativa do índice de área foliar em plantios clonais de Eucalyptus saligna Smith. **Ciência Florestal**, [S.l.], v.29, n.2, p.885–899, 2019.

BERGLUND, E. Z. Using Agent-Based Modeling for Water Resources Planning and Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.l.], v.141, n.11, p.04015025, 2015.

BESKOW, S. **LASH Model**: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. Doutorado em Engenharia Agrícola — Universidade Federal de Lavras.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. d.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, [S.l.], v.68, p.265 – 274, 06 2011.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. da. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **CATENA**, [S.l.], v.86, n.3, p.160–171, 2011.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological Prediction in a Tropical Watershed Dominated by Oxisols Using a Distributed Hydrological Model. **Water Resources Management**, [S.l.], v.27, p.341–363, 2013.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. (Ed.). **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. 1.ed. [S.l.]: Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. p.8–14.

BESKOW, S.; TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q.; CALDEIRA, T. L.; AQUINO, L. S. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v.61, n.14, p.2567–2578, 2016.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.69, p.119–143, 1984.

BIOLCHINI, J.; MIAN, P. G.; NATALI, A. C. C.; TRAVASSOS, G. H. Systematic review in software engineering. **System Engineering and Computer Science Department COPPE/UFRJ, Technical Report ES**, [S.l.], v.679, n.05, p.31, 2005.

BITHELL, M.; BRASINGTON, J. Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. **Environmental Modelling & Software**, [S.l.], v.24, n.2, p.173 – 190, 2009.

BOAR, A.; BASTIDA, R.; MARIMON, F. A Systematic Literature Review. Relationships between the Sharing Economy, Sustainability and Sustainable Development Goals. **Sustainability**, [S.l.], v.12, n.17, 2020.

BOISSIER, O.; BORDINI, R. H.; HÜBNER, J. F.; RICCI, A.; SANTI, A. Multi-agent oriented programming with JaCaMo. **Science of Computer Programming**, [S.l.], 2011.

BORDINI, R. H.; HÜBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

BORN, M. B.; MOTA, F. P.; AGUIAR, M. S.; ADAMATTI, D. F. Utilização do Discurso do Sujeito Coletivo para Descoberta de Estratégias de Indivíduos em Jogos na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, [S.l.], v.11, n.1, p.118–138, 2022.

BRAS, R. L. **Hydrology**: An Introduction to Hydrologic Sciences. [S.l.]: Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. 643p.

BRASINGTON, J.; EL-HAMES, A.; RICHARDS, K. Hydrological modelling in humid tropical catchments. In: HARPER, D.; BROWN, A. (Ed.). **The Sustainable Management of Tropical Catchments**. Chichester: John Wiley & Sons Limited, 1998. p.313–336.

BUDGEN, D.; BRERETON, P. Performing systematic literature reviews in software engineering. In: **Proceedings of the 28th international conference on Software engineering**. [S.l.]: Shanghai, 2006. p.1051–1052.

BURNASH, R. J.; FERRAL, R. L.; MCGUIRE, R. A. **A generalized streamflow simulation system**: Conceptual modeling for digital computers. [S.l.]: Sacramento: Joint Federal & State River Forecast Center, 1973.

CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH)**: aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul. 2016. Mestrado em Recursos Hídricos — Universidade Federal de Pelotas.

CALDEIRA, T. L. **Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo**. 2019. Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água — Universidade Federal de Pelotas.

CALDEIRA, T. L.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; TIMM, L. C.; VIOLA, M. R. LASH hydrological model: An analysis focused on spatial discretization. **CATENA**, [S.l.], v.173, p.183 – 193, 2019.

CALDEIRA, T. L.; OLIVEIRA, V. A.; STEINMETZ, A. A.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S. Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, [S.l.], v.5, n.1, p.22–32, 2018.

CHEN, L.; XIAO, S. Perceptions, challenges and coping strategies of science teachers in teaching socioscientific issues: A systematic review. **Educational Research Review**, [S.l.], v.32, p.100377, 2021.

CHENG, D. K. **Analysis of linear systems**. [S.l.]: Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1959. 431p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 1988. 572p.

CLARK, M. P.; BIERKENS, M. F. P.; SAMANIEGO, L.; WOODS, R. A.; UIJLENHOET, R.; BENNETT, K. E.; PAUWELS, V. R. N.; CAI, X.; WOOD, A. W.; PETERS-LIDARD, C. D. The evolution of process-based hydrologic models: historical challenges and the collective

quest for physical realism. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.l.], v.21, p.3427—-3440, 2017.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. D.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v.52, n.5, p.878–895, 2007.

CORREIA, F. W.; ALVALÁ, R.; MANZI, A. Distribuição sazonal e global da umidade do solo para inicialização em modelos numéricos de previsão de tempo e clima. In: **XIII congresso Brasileiro de Meteorologia**. [S.l.: s.n.], 2004.

CROOKS, A. T.; HEPPENSTALL, A. J. Introduction to Agent-Based Modelling. In: HEPPENSTALL, A. J.; CROOKS, A. T.; SEE, L. M.; BATTY, M. (Ed.). **Agent-Based Models of Geographical Systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p.85–105.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Capão do Leão**. [S.l.]: Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 54p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Geomorfologia, solos e capacidade de uso das terras do município de Pedro Osório**. [S.l.]: Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 52p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Pelotas**. [S.l.]: Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 50p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Herval**. [S.l.]: Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1996. 13p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e terras do planalto Sul-Rio-Grandense e planícies costeiras**. [S.l.]: Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 43p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S.; NUNES, M. L.; COSTA, F. A.; SOARES, M. J.; COSTA, C. N. **Estudo dos solos do município de Piratini**. [S.l.]: Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1997. 90p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S.; NUNES, M. L.; SOARES, M. J.; COSTA, C. N. **Estudo dos solos do município de Canguçu**. [S.l.]: Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1997. 90p.

CUNHA, Z. A. d. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Xingu**. 2021. Mestrado em Recursos Hídricos — Universidade Federal de Pelotas.

DACOMBE, R. Systematic Reviews in Political Science: What Can the Approach Contribute to Political Research? **Political Studies Review**, [S.l.], v.16, n.2, p.148–157, 2018.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B.; DWARAKISH, G. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, [S.l.], v.4, p.1001–1007, 2015.

DHAMI, B.; PANDEY, A. Comparative review of recently developed hydrological models. **Journal of Indian Water Resources Society**, [S.l.], v.33, n.3, p.34–41, 2013.

DOHOS, D.; HANáK, L.; SZAKáCS, Z.; KISS, S.; PáRNICZKY, A.; EROSS, B.; PáZMáNY, P.; HEGYI, P.; SARLóS, P. Systematic review with meta-analysis: the effects of immunomodulator or biological withdrawal from mono- or combination therapy in inflammatory bowel disease. **Alimentary pharmacology & therapeutics**, [S.l.], v.53, p.220–233, 01 2021.

DROGOUL, A.; AMOUROUX, E.; CAILLOU, P.; GAUDOU, B.; GRIGNARD, A.; MARILLEAU, N.; TAILLANDIER, P.; VAVASSEUR, M.; VO, D.-A.; ZUCKER, J.-D. GAMA: multi-level and complex environment for agent-based models and simulations. In: **12th International conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**. [S.l.: s.n.], 2013. p.1361–1362.

DROGOUL, A.; MICHEL, F.; FERBER, J. Multi-Agent Systems and Simulation: A Survey from the Agent Community's Perspective. In: **Multi-Agent Systems**. [S.l.: s.n.], 2009.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Research**, [S.l.], v.28, n.4, p.1015–1031, 1992.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.158, n.3-4, p.265–284, 1994.

FAGUNDES, J. L.; FONSECA, D. M.; MISTURA, C.; MORAIS, R. V.; VITOR, C. M. T.; GOMIDE, J. A.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; CASAGRANDE, D. R.; COSTA, L. T. Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [S.l.], v.35, p.21 – 29, 2006.

FARIAS, G.; LEITZKE, B.; BORN, M.; AGUIAR, M.; ADAMATTI, D. Water Resources Analysis: An Approach based on Agent-Based Modeling. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, [S.l.], v.27, n.2, p.81–95, 2020.

FARIAS, G.; LEITZKE, B. S.; BORN, M.; AGUIAR, M. S.; ADAMATTI, D. Systematic Review of Natural Resource Management using Multiagent Systems and Role-Playing Games. **Research in Computing Science. XVIII Mexican International Conference on Artificial Intelligence - MICAI**, [S.l.], v.148, n.11, p.91–102, 2019.

FARIAS, G. P.; BORN, M. B.; LEITZKE, B. S.; AGUIAR, M. S.; ADAMATTI, D. F. Modelagem Baseada em Agentes para Análise de Recursos Hídricos. In: **XIII Workshop-Escola de Agentes, seus Ambientes e Aplicações - WESAAC**. Santa Catarina, Brasil: Florianópolis: UFSC, 2019. p.1–12.

FAROLFI, S.; MÜLLER, J.-P.; BONTÉ, B. An iterative construction of multi-agent models to represent water supply and demand dynamics at the catchment level. **Environmental Modelling & Software**, [S.l.], v.25, n.10, p.1130–1148, oct 2010.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, [S.l.], v.45, n.2, 2007.

GAUDOU, B.; SIBERTIN-BLANC, C.; THÉROND, O.; AMBLARD, F.; AUDA, Y.; ARCANGELI, J.-P.; BALESTRAT, M.; CHARRON-MOIREZ, M.-H.; GONDET, E.; HONG, Y.; LARDY, R.; LOUAIL, T.; MAYOR, E.; PANZOLI, D.; SAUVAGE, S.; SANCHEZ-PEREZ, J.; TAILLANDIER, P.; NGUYEN, V. B.; VAVASSEUR, M.; MAZZEGA, P. The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. In: ALAM, S. J.; DYKE PARUNAK, H. V. (Ed.). **International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS 2013)**. [S.l.]: Springer, Lecture Notes in Computer, 2014. v.8235, p.85–110.

GILBERT, R. O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. [S.l.]: New Yourk: Van Nostrand Reinhold, 1987.

GIONGO, R.; PADOVANI, R.; VETTORAZZI, A. Variabilidade espacial e temporal do albedo obtido a partir de imagens MODIS na região do Pantanal. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. [S.l.: s.n.], 2009.

HERRERA, D. J. M.; ALVES, C. D. M. A. Contribuições de Modelos Baseados em Agentes (MBA) para gestão de sistemas hídricos urbanos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S.l.], v.15, 2018.

HESSEL, R.; MESSING, I.; LIDING, C.; RITSEMA, C.; STOLTE, J. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. **CATENA**, [S.l.], v.54, n.1, p.289 – 302, 2003.

HROMADKA, T. Rainfall-runoff models: A review. **Environmental Software**, [S.l.], v.5, n.2, p.82–103, 1990.

HÜBNER, J. F.; SICHMAN, J. S.; BOISSIER, O. Developing organised multiagent systems using the MOISE+ model: programming issues at the system and agent levels. **Int. J. Agent-Oriented Software Engineering**, [S.l.], v.1, n.3/4, p.370–395, 2007.

IBGE. Mapa de Solos da Folha SI.22 - Lagoa Mirim. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, [S.l.], 2020. Acessado em 20 de janeiro de 2020. Online. Disponível em: <https://dados.gov.br/>.

INMET. Dados Meteorológicos. **Instituto Nacional de Meteorologia**, [S.l.], 2020. Acessado em 18 de fevereiro de 2020. Online. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4.ed. [S.l.]: London: Griffin, 1975.

KINGSTON, G. B.; MAIER, H. R.; DANDY, G. C. AI techniques for hydrological modeling and management. I: Simulation. **Water Resources Research Progress**, [S.l.], p.15–65, 2008.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S.; BUDGEN, D.; BRERETON, P.; TURNER, M.; LINKMAN, S.; JøRGENSEN, M.; MENDES, E.; VISAGGIO, G. **Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. [S.l.]: Keele University and University of Durham, 2007. (EBSE-2007-01).

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v.31, n.1, p.13–24, 1986.

KOCSIS, T.; KOVÁCS-SZÉKELY, I.; ANDA, A. Comparison of parametric and non-parametric time-series analysis methods on a long-term meteorological data set. **Central European Geology**, [S.l.], v.60, n.3, p.316–332, 2017.

KÖHNEN, M.; DREIER, M.; SEERALAN, T.; KRISTON, L.; HäRTER, M.; BAUMEISTER, H.; LIEBHERZ, S. Evidence on Technology-Based Psychological Interventions in Diagnosed Depression: Systematic Review. **JMIR Ment Health**, [S.l.], v.8, n.2, p.e21700, Feb 2021.

KOTZIAN, H. B.; MARQUES, D. M. Lagoa Mirim e a convenção Ramsar: um modelo para ação transfronteiriça na conservação de recursos hídricos. **Revista de gestão de água da América Latina**, [S.l.], v.1, n.2, p.101–111, 2004.

KOUCHI, D. H.; ESMAILI, K.; FARIDHOSSEINI, A.; SANAEINEJAD, S. H.; KHALILI, D.; ABBASPOUR, K. C. Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms. **Water**, [S.l.], v.9, n.6, 2017.

LABGEO. Laboratório de Geoprocessamento. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, [S.l.], 2020. Acessado em 20 de fevereiro de 2020. Online. Disponível em: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/direccion-general-recursos-naturales>.

LARDY, R.; MAZZEGA, P.; SIBERTIN-BLANC, C.; AUDA, Y.; SANCHEZ-PEREZ, J.-M.; SAUVAGE, S.; THEROND, O. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In: AMES,

D. P.; QUINN, N. W. T.; ENVIRONMENTAL MODELLING, A. E. R. 7th International Congress on; SOFTWARE (Ed.). **International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)**. [S.l.: s.n.], 2014.

LE PAGE, C.; BOUSQUET, F.; BAKAM, I.; BAH, A.; BARON, C. CORMAS : A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales. In: **Wageningen** : Resource Modeling Association. [S.l.: s.n.], 2000.

LE PAGE, M.; FAKIR, Y.; AOUISSI, J. Chapter 7 - Modeling for integrated water resources management in the Mediterranean region. In: ZRIBI, M.; BROCCA, L.; TRAMBLAY, Y.; MOLLE, F. (Ed.). **Water Resources in the Mediterranean Region**. [S.l.]: Elsevier, 2020. p.157–190.

LEITZKE, B. S.; FARIAS, G. P.; AGUIAR, M. S.; MELO, M.; GONCALVES, M.; BORN, M. B.; RODRIGUES, P.; MARTINS, V.; BARBOSA, R. M.; ADAMATTI, D. F. Sistemas Multiagente e Jogos de Papéis para Gestão de Recursos Naturais. In: **XIII Workshop-Escola de Agentes, seus Ambientes e Aplicações - WESAAC**. Santa Catarina, Brasil: Florianópolis: UFSC, 2019. p.1–6.

LEITZKE, B. S.; FARIAS, G. P.; MELO, M.; GONÇALVES, M.; BORN, M. B.; RODRIGUES, P.; MARTINS, V.; BARBOSA, R.; AGUIAR, M. S.; ADAMATTI, D. F. Sistema Multiagente para Gestão de Recursos Hídricos: Modelagem da Bacia do São Gonçalo e da Lagoa Mirim. In: **Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais - WCAMA**. Pará, Brasil: Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p.87–96.

LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. Proceedings of the Royal Society of London. **Series A. Mathematical and Physical Sciences**, [S.l.], v.229, n.1178, p.281–316, 1955.

LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. Proceedings of the Royal Society of London. **Series A. Mathematical and Physical Sciences**, [S.l.], v.229, n.1178, p.317–345, 1955.

LILYEA, B. V.; COOPER, R.; RICE, J.; DUPRAW, M.; ALLSOP, S. R. Conducting A Systematic Literature Review on Water-Related Attitudes, Behaviors, and Stakeholder Engagement Approaches in Florida: Strategies and Tools. **The International Journal of Interdisciplinary Social Sciences: Annual Review**, [S.l.], v.11, p.87–102, 12 2016.

MAJUMDAR, S.; SHUKLA, S.; MAITI, A. Open Agent Based Runoff and Rrosion Simulation (OARES): a generic cross platform tool for spatio - temporal watershed monitoring using climate forecast system reanalysis weather data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.l.], v.IV-4, p.125–132, 2018.

MALEK, J.; DESAI, T. N. A systematic literature review to map literature focus of sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.256, p.120345, 2020.

MANN, H. B. Non-Parametric Tests against Trend. **Econometrica**, [S.l.], v.13, n.3, p.245–259, 1945.

MARIANO, D. J. A. K.; ALVES, C. A. A. d. M. A. The application of role-playing games and agent-based modelling to the collaborative water management in peri-urban communities. **RBRH**, [S.l.], v.25, 00 2020.

MARTINS, V. B.; ADAMATTI, D. F. Multiagent Systems and Role-Playing Games Applied to Natural Resources Management. In: DONG, Y.; HERRERA-VIEDMA, E.; MATSUI, K.; OMATSU, S.; GONZÁLEZ BRIONES, A.; RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, S. (Ed.). **Advances in Intelligent Systems and Computing**. [S.l.]: Springer, 2021. v.1237, p.221—230.

MCCARTY, E. B.; SOLDATOVA, L.; BRANT, J. A.; NEWMAN, J. G. Innovations in otorhinolaryngology in the age of COVID-19: A systematic literature review. **World Journal of Otorhinolaryngology - Head and Neck Surgery**, [S.l.], 2021.

MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.l.], v.40, n.1, p.7–25, 2016.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia**: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. [S.l.]: Lavras: UFLA, 2013. 455p.

MELLO, C.; VIOLA, M.; NORTON, L.; SILVA, A.; WEIMAR, F. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **CATENA**, [S.l.], v.75, n.3, p.235 – 247, 2008.

MENGIST, W.; SOROMESSA, T.; LEGESE, G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. **MethodsX**, [S.l.], v.7, p.100777, 2020.

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.178, p.703–722, 2018.

MIRANDA, A.; MIRANDA, H.; GRACE, J.; MEIR, P.; LLOYD, J. Carbon dioxide fluxes over cerrado sensu stricto, Central Brazil. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Ed.). **Amazionian deforestation and climate**. [S.l.]: New York: Wiley, 1996. p.353–364.

MISHRA, S. K.; SAHU, R. K.; ELDHO, T. I.; JAIN, M. K. An Improved I a S Relation Incorporating Antecedent Moisture in SCS-CN Methodology. **Water Resources Management**, [S.l.], v.20, p.643—-660, 2006.

MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. In: SOROOSHIAN, S.; HSU, K.-L.; COPPOLA, E.; TOMASSETTI, B.; VERDECCHIA, M.; VISCONTI, G. (Ed.). **Hydrological Modelling and the Water Cycle**: Coupling the Atmospheric and Hydrological Models. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p.1–24.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, [S.l.], v.50, p.885–900, 2007.

MOTA, F.; BORN, M.; AGUIAR, M.; ADAMATTI, D. The Strategies of the Players of an RPG Game in the Context of Water Resources Management: an analysis based on the Discourse of the Collective Subject. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S.l.], v.25, p.1, 2021.

MOTA, F. P.; BORN, M. B.; AGUIAR, M. S.; ADAMATTI, D. F. Mapping needs, motivations, habits and strategies of RPG players in the context of water resources management. In: **2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)**. [S.l.: s.n.], 2020. p.1–8.

MOURA, M. M. D.; BESKOW, S.; TERRA, F. S.; MELLO, C. R. D.; CUNHA, Z. A. D.; CASSALHO, F. Influence of different relief information sources on the geomorphological characterization of small watersheds. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.l.], v.93, 2021.

OTTONI, M.; OTTONI FILHO, T.; SCHAAP, M. G.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; ROTUNNO FILHO, O. C. Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedotransfer Functions for Water Retention. **Vadose Zone Journal**, [S.l.], v.17, 2018.

POULADI, P.; AFSHAR, A.; AFSHAR, M.; MOLAJOU, A.; FARAHMAND, H. Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: Application of theory of planned behavior. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.576, p.736–748, 2019.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of hydrology**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 1993. p.1–51.

REIS, J.; SANTO, P.; MELãO, N. Influence of artificial intelligence on public employment and its impact on politics: A systematic literature review. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, [S.l.], v.18, n.3, p.1–22, 2021.

RICCI, A.; PIUNTI, M.; VIROLI, M.; OMICINI, A. Environment Programming in CArtAgO. In: **Multi-Agent Programming**: Languages, Tools and Applications. [S.l.]: Springer, 2009. p.259–288. (Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations).

RODRIGUES, M. S.; SILVA, J.; CRUZ, M. R.; C, C.; J, D.; VIEIRA, S. E.; TAVARES, C. J.; PIMENTEL, S. F. M. Biologic disease-modifying anti-rheumatic drugs and patient-reported outcomes in axial SpA: a systematic review and a call for action. **Clinical Rheumatology**, [S.l.], v.40, p.33–41, 2021.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; RUNNING, S. W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v.58, n.8, p.1658–1676, 2013.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence**: A Modern Approach. [S.l.]: New Jersey: Prentice Hall, 2002. 932p.

SCHREINEMACHERS, P.; BERGER, T. An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems. **Environmental Modelling & Software**, [S.l.], v.26, n.7, p.845–859, 2011.

SCS. Washington: Soil Conservation Service/USDA. **National Engineering Handbook**, [S.l.], 1971.

SIMMONDS, J.; GÓMEZ, J.; LEDEZMA, A. The role of agent-based modeling and multi-agent systems in flood-based hydrological problems: A brief review. **Journal of Water and Climate Change**, [S.l.], v.11, n.4, p.1580–1602, 2020.

SINGH, J.; KNAPP, H. V.; ARNOLD, J.; DEMISSIE, M. HYDROLOGICAL MODELING OF THE IROQUOIS RIVER WATERSHED USING HSPF AND SWAT1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, [S.l.], v.41, n.2, p.343–360, 2005.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, [S.l.], v.26, n.8, p.1270–1276, 2012.

SNEYERS, R. **On the statistical analysis of series of observations**. [S.l.]: Geneva: World Meteorological Organization, 1991. n.143.

STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. Exportação de carga poluidora para identificação de áreas úmidas sob risco ambiental na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. **Sociedade & Natureza**, [S.l.], v.20, n.2, p.43–67, 2008.

TAILLANDIER, P.; GAUDOU, B.; GRIGNARD, A.; HUYNH, Q.-N.; MARILLEAU, N.; CAILLOU, P.; PHILIPPON, D.; DROGOUL, A. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. **Geoinformatica**, [S.l.], v.23, n.2, p.299–322, 2019.

TAILLANDIER, P.; VO, D.-A.; AMOUROUX, E.; DROGOUL, A. GAMA: A Simulation Platform That Integrates Geographical Information Data, Agent-Based Modeling and Multi-scale Control. In: N, D.; A, L.; M, W. (Ed.). **Principles and Practice of Multi-Agent Systems. PRIMA 2010. Lecture Notes in Computer Science**. [S.l.]: Heidelberg: Springer, 2012. v.7057, p.242–258.

TAN, L.; GUO, J.; MOHANARAJAH, S.; ZHOU, K. Can we detect trends in natural disaster management with artificial intelligence? A review of modeling practices. **Natural Hazards**, [S.l.], 2020.

TISUE, S.; WILENSKY, U. NetLogo: A simple environment for modeling complexity. **International Conference on Complex Systems**, Boston, MA, v.21, p.16–21, 01 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2.ed. [S.l.]: Porto Alegre: ABRH, 2005. 678p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4.ed. [S.l.]: São Paulo: ABRH, 2012. 944p.

USGS. Earth Explorer. **U.S. Geological Survey**, [S.l.], 2020. Acessado em 17 de janeiro de 2020. Online. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

VARGAS, M. M. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB®**: aprimoramento da propagação em rios e da calibração. 2021. Mestrado em Recursos Hídricos — Universidade Federal de Pelotas.

VARGAS, M. M.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L.; CORRÊA, L. L.; CUNHA, Z. A. SYHDA - System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v.24, p.e11, 2019.

VARGAS, M. M.; MELLO, C. R.; MOURA, M. M.; BESKOW, T. L. C.; SILVEIRA, J. P. M.; BESKOW, S. Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB® com ênfase em calibração multiobjetivo. In: **XXII Encontro de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pelotas**. [S.l.: s.n.], 2020.

VÁZQUEZ OSORIO, A.; Soto Barrera, C. A.; Soto, J. P.; Rolón Aguilar, E.; Rolón Aguilar, J. C. Water Quality Monitoring Systems Based on Intelligent Agents: A Systematic Literature Review. In: **VXII Mexican International Conference on Artificial Intelligence**. [S.l.: s.n.], 2018. p.106–116.

VERBRUGGEN, S.; DEPAEPE, F.; TORBEYNS, J. Effectiveness of educational technology in early mathematics education: A systematic literature review. **International Journal of Child-Computer Interaction**, [S.l.], v.27, p.100220, 03 2021.

VICARIO, S. A.; MAZZOLENI, M.; BHAMIDIPATI, S.; GHARESIFARD, M.; RIDOLFI, E.; PANDOLFO, C.; ALFONSO, L. Unravelling the influence of human behaviour on reducing casualties during flood evacuation. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v.65, n.14, p.2359–2375, 2020.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região do Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. Mestrado em Engenharia Agrícola — Universidade Federal de Lavras.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; D, N. L. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, [S.l.], v.28, p.4537–4550, 2014.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Applicability of the LASH Model for Hydrological Simulation of the Grande River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.l.], v.18, n.12, p.1639–1652, 2013.

VRUGT, J. A.; ROBINSON, B. A. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.l.], v.104, n.3, p.708–711, 2007.

WASSON, J.-G.; TUSSEAU-VUILLEMIN, M.-H.; ANDRéASSIAN, V.; PERRIN, C.; FAURE, J.-B.; BARRETEAU, O.; BOUSQUET, M.; CHASTAN, B. What kind of water models are needed for the implementation of the European water framework directive? Examples from France. **International Journal of River Basin Management**, [S.l.], v.1, n.2, p.125–135, 2003.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. [S.l.]: New York: John Wiley & Sons, 2002.

YANG, A.; DUTTA, D.; VAZE, J.; KIM, S.; PODGER, G. An integrated modelling framework for building a daily river system model for the Murray–Darling Basin, Australia. **International Journal of River Basin Management**, [S.l.], v.15, n.3, p.373–384, 2017.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v.259, n.1, p.254–271, 2002.

[]

A ANEXOS

A.1 Teste não-paramétrico de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) é realizado através de uma função estatística dos dados observados, baseado em duas hipóteses: nula (H_0) ou alternativa (H_a). Segundo SNEYERS (1991), a hipótese nula é definida como a que assume que a função de distribuição dos dados atende a certas condições bem definidas. Dessa forma, as variáveis aleatórias da sequência de dados são independentes e distribuídas igualmente. E a hipótese alternativa é aquela que afirma que todas as condições, ou parte delas, são diferentes da hipótese nula. Assim, existe uma tendência monotônica dos dados ao longo do tempo.

Para se determinar a hipótese verdadeira deve-se previamente definir uma região crítica (ou de rejeição). Após o teste estatístico ser realizado, é verificado se o valor obtido está contido na região crítica. Quando o valor está nessa região, H_0 é rejeitada. Do contrário, ela é aceita.

O teste de Mann-Kendall é realizado a partir do teste estatístico S_{MK}, apresentado na Equação A.1, como segue.

$$S_{MK} = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^{m} sgn(x_j - x_i), \tag{A.1}$$

onde $i = 1, 2, 3, ..., m-1$, $j = 2, 3, 4, ..., m$, x_k são os respectivos valores do conjunto de dados da série com $k \in \{i, j\}$, m é o tamanho do conjunto de dados, e $sgn(x)$ é a função sinal definida como:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se} \quad (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{se} \quad (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{se} \quad (x_j - x_i) < 0 \end{cases} . \tag{A.2}$$

A análise deste teste indica três possíveis conclusões. Se o valor de S_{MK} for positivo, a série temporal apresenta uma tendência crescente. Quando o valor de S_{MK} é negativo, a série apresenta uma tendência decrescente. E quando o valor de S_{MK} é nulo, a sequência não apresenta tendência.

MANN (1945) e KENDALL (1975) provaram que para $m \geq 8$, a estatística S_{MK} é normalmente distribuída, com a seguinte variância:

$$V(S_{MK}) = \frac{m(m-1)(2m+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p - 1)(2t_p + 5)}{18}, \tag{A.3}$$

onde q é a quantidade de grupos vinculados (contendo dados equivalentes), e t_p é a quantidade de dados na p-ésima posição (GILBERT, 1987). Neste caso, a variável normal padrão Z exibida

na Equação (A.4) pode ser utilizada como teste de hipótese do teste de Mann-Kendall.

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S_{MK} - 1}{\sqrt{Var(S_{MK})}}, & \text{se} \quad S_{MK} > 0 \\ 0, & \text{se} \quad S_{MK} = 0 \\ \dfrac{S_{MK} + 1}{\sqrt{Var(S_{MK})}}, & \text{se} \quad S_{MK} < 0 \end{cases}, \tag{A.4}$$

onde a hipótese nula é satisfeita quando $|Z| < Z_{\alpha_s/2}$, sendo α_s o nível de significância, normalmente fixado como $\alpha_s = 0.05 = 5\%$, e $Z_{\alpha_s/2}$=1.96.

B APÊNDICES

B.1 Síntese dos estudos primários obtidos na RSL

A Seção 2.3.1 abordou a metodologia envolvida no desenvolvimento da revisão sistemática da literatura, onde o protocolo foi definido com o intuito de responder a questão de pesquisa determinada como: *quais foram os processos e desafios de artigos que envolveram SMA e MCV para resolver problemas hidrológicos*? Para isso, algumas das principais etapas da RSL foram a identificação e análise dos principais trabalhos publicados sobre o tema. Além disso, cinco questões específicas (QE) e cinco questões de qualidade (QQ) foram elaboradas com o intuito de nortear a resposta para a questão de pesquisa, como segue.

QE_1. Como foram definidos os agentes do SMA, e qual(is) o(s) objetivo(s) desse modelo?

QE_2. Qual foi o MCV utilizado, e qual(is) o(s) objetivo(s) desse modelo?

QE_3. Foram necessárias outras técnicas para gerar o estudo? Se sim, quais e como foram utilizadas e relacionadas às ferramentas de SMA e MCV?

QE_4. Como o trabalho integrou o uso das técnicas de SMA e MCV?

QE_5. Os principais desafios encontrados possuem relação com os processos de modelagem do SMA e/ou do MCV?

QQ_1. Os resultados satisfazem os objetivos do estudo?

QQ_2. O estudo apresenta uma análise dos resultados obtidos?

QQ_3. A metodologia adotada é apresentada de forma clara e detalhada?

QQ_4. O estudo analisa as vantagens e desvantagens dos métodos utilizados?

QQ_5. O estudo apresenta uma análise sobre a integração das modelagens SMA e MCV?

Ao final da RSL, três estudos primários foram selecionados como os estudos mais relevantes ao tema, que são os trabalhos de BITHELL; BRASINGTON (2009), YANG et al. (2017), e MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018). Respectivamente, considerando estes como primeiro, segundo e terceiro trabalho, as questões específicas e de qualidade são apresentadas a seguir, através das Tabelas 35, 36, 37. Os dados referentes a metodologia, aos resultados e aos desafios encontrados, em cada um dos estudos primários, serão comentados na sequência.

Tabela 35: Respostas do primeiro trabalho.

Question	Response
QE 1	Os agentes do SMA são as famílias de agricultores, onde a interação ocorre pela competição por terra e madeira. Não há interação entre os agentes, apenas de indivíduos com o ambiente. O modelo possui uma relação mais direta com o modelo de dinâmica florestal, onde as famílias se estabelecem em uma parte da região, e cada indivíduo pode manter as células livres de árvores e alocar um tipo de uso de terra, como arroz ou milho. As famílias consomem a madeira das árvores e as replantam em outros locais da região.
QE 2	Para o modelo acoplado, foi adotado o modelo chuva-vazão distribuído e baseado em terreno de BRASINGTON; EL-HAMES; RICHARDS (1998). A partir da discretização regular do MDE em células de $20m$, foi utilizado um modelo de célula tridimensional. A precipitação foi considerada uniformemente distribuída em toda a região, e a sua série temporal anual é reproduzida de forma padrão ano após ano no modelo. Cada célula recebe uma informação que serve de entrada para o modelo hidrológico, e ele retorna parâmetros como a condutividade hidráulica, capacidade do dossel da vegetação, e a resposta dos cálculos sobre os fluxos de umidade do solo, a qual é gerada a partir de um solucionador de volume finito por uma estrutura de quatro camadas.
QE 3	O uso de um modelo baseado em indivíduos foi utilizado para representar a dinâmica florestal das árvores. As árvores crescem conforme um modelo dinâmico de competição chamado SORTIE, o qual usa relações alométricas para obter a dinâmica florestal necessária. Ele fornece a disponibilidade de madeira para os agricultores, o que modifica o SMA, mas ele não possui interação direta com o modelo hidrológico.
QE 4	A partir dos resultados dos sistemas florestal e de agricultores, um mapa de uso do solo é gerado e implementado ao MCV. Esse por sua vez opera de forma independente e retorna as componentes hidrológicas para o SMA. As modificações na cobertura do solo definem a quantidade de umidade do solo de forma espacialmente distribuída, bem como as vazões e inundações. As informações de mudanças na capacidade do dossel e na condutividade hidráulica são necessárias para gerar o acoplamento entre o SMA e o MCV.
QE 5	A dinâmica, as escalas espaciais e temporais, o tempo de processamento, e a validação entre os submodelos e o modelo acoplado são grandes desafios encontrados. Separadamente, o SMA e o MCV não apresentam todos esses desafios, pois é possível gerar a modelagem, calibração de parâmetros e a validação sem a dependência de dados obtidos por outros sistemas. Já a integração entre SMA e MCV depende de uma análise e planejamento para minimizar os desafios.
QQ 1	O objetivo principal foi o de desenvolver modelos dinâmicos em pequena escala, para construir um modelo acoplado que representasse o comportamento em larga escala da floresta, analisando as principais interações espaciais, e como elas interferem no dinamismo do sistema. Os resultados mostraram que, apesar de haver diversos desafios e possíveis melhorias para o modelo, ele descreve o comportamento do sistema ao relacionar as ações dos agentes, os dados hidrológicos e a dinâmica florestal. Mas fica evidente que, com um processamento mais rápido e com mais interações entre os modelos, os resultados poderiam ser melhores e mais detalhados.
QQ 2	No trabalho, os resultados são analisados através dos experimentos, conforme os componentes dos modelos são alterados. A análise realizada é referente as mudanças geradas no modelo acoplado, sem trazer uma análise quantitativa ou qualitativa dos dados obtidos. Isso é explicado nas conclusões do trabalho, onde os autores enfatizam que não é possível gerar uma análise de sensibilidade do modelo devido ao tempo computacional, a grande quantidade de parâmetros que devem ser explorados, e a não linearidade do sistema acoplado.
QQ 3	Pode-se constatar que o trabalho apresenta a metodologia com relação aos modelos desenvolvidos, e suas interações, incluindo um apêndice que explica parte de cada submodelo. Mas publicações anteriores são mencionadas, onde nelas estão detalhados os modelos, bem como aplicações e análises voltadas à pesquisa em questão. Além disso, é mencionado que características topográficas, pluviométricas e do solo foram obtidas anteriormente.
QQ 4	Ao longo da explicação dos modelos e suas interações, são comentadas algumas vantagens e desvantagens. Mas os autores fazem uma reflexão sobre algumas possíveis e importantes modificações que, mesmo trazendo desafios, podem ser realizadas para gerar resultados mais detalhados e melhores sobre o estudo, sendo uma das seções voltadas a essa temática.
QQ 5	A integração do SMA e MCV é brevemente analisada na seção dos resultados e no apêndice do trabalho. Conforme a inserção dos agentes agricultores no modelo, algumas mudanças importantes ocorrem com relação a umidade do solo, devido ao uso de madeira das árvores e a mudança no uso de solo. Além disso, com o aumento na população, maior foi a variação de equilíbrio sobre os componentes de escoamento simulados. E ainda, foi observado que tanto o escoamento, como a evapotranspiração foram altamente sensíveis ao aumento da agricultura gerada pelos agricultores.

Tabela 36: Respostas do segundo trabalho.

Question	Response
QE 1	O SMA é um sistema de simulação hidrológica homogêneo, que serve para vincular os modelos regionais individuais em um único modelo da bacia. 18 sub-regiões da bacia foram definidas como os agentes do sistema, modelados pelo sistema fluvial eWater Source. O comportamento de cada agente é determinado como um modelo de rio nascente, e se modifica apenas através dos valores dos parâmetros calculados. Cada agente recebe um nome ou ID, e deve ser representado através de quatro status com cores diferentes, para que a simulação seja facilmente compreendida. Os status são: configurado; em execução; feito; e falha. As interações dos agentes são implementadas a partir de três processos relacionados aos dados de fluxo entre as regiões, e aos tipos de interação que podem ser de duas formas: quando as saídas de uma região A afetam a entrada de outra região B; e quando as saídas de duas regiões A e B afetam, respectivamente, as entradas das regiões B e A.
QE 2	No trabalho foi utilizado o MCV Sacramento de BURNASH; FERRAL; MCGUIRE (1973). O objetivo foi integrar o MCV à estrutura de modelagem hidrológica SMDBRM, para gerar o escoamento não medido de cada sub-bacia.
QE 3	O trabalho é baseado na modelagem hidrológica eWater Source, a qual foi utilizada para desenvolver o modelo hidrológico conceitual diário SMDBRM com sete parâmetros de calibração. O modelo SMDBRM fornece a estrutura para o SMA, onde os agentes são as sub-regiões da bacia. Além disso, é utilizado um procedimento de calibração automática em etapas, onde cada sub-região é calibrada em uma ordem sequencial através da equação do balanço hídrico. Um dos valores calibrados é gerado a partir do MCV Sacramento. Os valores otimizados dos parâmetros de calibração são obtidos antes das simulações e atualizados em cada região por meio de um controlador de comportamento do agente. E ainda, foram utilizadas técnicas de programação paralela em três níveis, para diminuir o tempo computacional: agentes não conectados são executados em paralelo; as conexões do agente são executadas em paralelo; e diferentes simulações podem ser executadas em paralelo.
QE 4	Os agentes representam as regiões e interagem a partir da conectividade hidrológica entre os sistemas fluviais. Cada agente possui um projeto de estrutura nó-link. Na plataforma de modelagem integrada, o script de calibração é embutido, incluindo a calibração gerada no MCV. E assim, cada agente possui um controlador de comportamento que atualiza os valores já calibrados, antes da simulação.
QE 5	Os autores não comentam sobre desafios ao acoplar SMA e MCV. As dificuldades expostas ao longo do trabalho são relacionadas ao que o modelo propõe resolver. Com isso, os desafios se resumem em questões pontuais de calibração e validação do modelo.
QQ 1	O objetivo do trabalho foi voltado ao desenvolvimento de uma plataforma de modelagem homogênea de rios baseada em agentes para vincular os modelos individuais das regiões da bacia. Apesar da análise estatística mostrar que alguns resultados não são satisfatórios, os autores mencionam que foi possível alcançar os objetivos, pois o tempo e o desempenho do modelo foram bons em quase todas as regiões. Além disso, eles afirmam que a ferramenta apresenta resultados consistentes, explicáveis e comparáveis.
QQ 2	São analisados o tempo de execução e desempenho do modelo, em uma seção do trabalho. O tempo de calibração não foi mencionado, mas após obter os valores dos parâmetros calibrados, a simulação do modelo teve um processamento rápido. E o desempenho do modelo foi analisado estatisticamente, considerando as etapas de calibração e validação, se mostrando altamente satisfatório na maioria das regiões. Além disso, os autores apresentam uma discussão sobre a plataforma de modelagem. Não são mencionadas possíveis melhorias do modelo ou trabalhos futuros.
QQ 3	O trabalho apresenta seções de explicação sobre a metodologia abordada e as interações entre as técnicas. Mas por ser baseado em modelagens já existentes, os autores direcionam a metodologia ao desenvolvimento do SMA e do processo de autocalibração do modelo. A estrutura dos agentes, suas interações, e forma de execução são explicadas de forma detalhada. Já os modelos hidrológicos são mencionados, incluindo o MCV, mas não são explicitamente apresentados.
QQ 4	Os autores mencionam apenas as vantagens em se utilizar SMA. Dentre elas estão a facilidade em realizar os processos de computação paralela; possibilidade de modelar sistemas ambientais complexos; e simular e analisar o comportamento não linear de sistemas sociais e naturais. Além disso, comentam que a escolha do MCV Sacramento foi realizada através de uma análise entre seis modelos, mas não abordam as vantagens e desvantagens das ferramentas.
QQ 5	Não foram discutidas as integrações entre o SMA e o MCV. A integração foi mencionada ao explicar a relação entre os agentes e os dados calibrados dos modelos regionais.

Tabela 37: Respostas do terceiro trabalho.

Question	Response
QE 1	Os principais agentes definidos foram as gotas de chuva, o solo, a altitude e a quantidade de água. O principal objetivo do SMA foi simular os processos do sistema chuva-vazão e a erosão do solo da bacia. Para isso, foi utilizado o ambiente de modelagem programável multiagente NetLogo, de código aberto. O ambiente foi dividido em células, e em cada uma foi considerada uma classe de solo a partir do MDE, o qual é reamostrado no NetLogo pela abordagem do vizinho mais próximo. A quantidade de água usada é programada para cada célula. As gotas de chuva são geradas de acordo com os dados de precipitação. Dependendo da altitude correspondente de cada célula, as gotas se acumulam na região, e se tornam agentes de quantidade de água. O solo se modifica a partir do efeito das gotas de chuva. O MDE é modificado conforme variação de altitude e solo.
QE 2	O MCV final é a ferramenta baseada em agentes OARES, que tem como objetivo simular a relação chuva-vazão e a erosão do solo. O modelo fornece dados como: total de chuva-vazão junto com o ajuste de regressão; total de mudança do uso do solo; e erosão do solo em imagem e escalas de cores.
QE 3	O modelo Soil Conservation Service foi escolhido para modelar e simular o escoamento direto da bacia. Para gerar os mapas de uso do solo, foram utilizadas imagens da ferramenta Landsat 8. Para obter informações sobre a declividade foi utilizado o MDE ASTER. E para ser possível analisar o sistema de previsão de clima foram obtidos dados meteorológicos de 36 anos da bacia. Esses dados e as ferramentas foram acoplados para gerar a plataforma OARES. Para validar o modelo, foram realizadas análises de comparações entre o OARES e os modelos Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) e SWAT.
QE 4	A integração entre SMA e MCV foi gerada a partir do desenvolvimento da ferramenta OARES. A simulação ocorre através da integração das bibliotecas Python, R e NetLogo. O ambiente é dividido em células, que recebem os dados de entradas preparados a partir dos dados meteorológicos, hidrológicos e do MDE. Os agentes se movem pelo ambiente através de critérios de fluxo adotados, carregam uma unidade de solo segundo um algoritmo, e modificam sua quantidade de água dependendo das condições do ambiente e da elevação.
QE 5	Para gerar os dados de vazão e erosão do solo, foram necessárias ferramentas e equações que gerassem as respostas para o sistema. Mas os resultados mostraram diferenças nas estimativas das variáveis. Além disso, para utilizar o MDE foi necessário reamostrar ele na plataforma NetLogo, o que diminui a precisão do modelo.
QQ 1	O objetivo do trabalho foi explorar a modelagem de um SMA para analisar os processos chuva-vazão e a erosão do solo da bacia hidrográfica Asan. Pela análise dos resultados, a ferramenta OARES mostrou ser prática e leve. Além de rodar em bibliotecas de código aberto, ela pode ser rodada com grandes números de dados.
QQ 2	O estudo realiza uma análise quantitativa sobre as saídas do modelo OARES. Mais precisamente são analisados os mapas de uso do solo, a relação chuva-vazão e escoamento superficial estimado, e erosão do solo. Além disso, no trabalho é analisada a validade do modelo através de comparação com modelos convencionais. Simulações adicionais no OARES foram realizadas para medir quantitativamente as variações decadais nos dados de precipitação obtidos e o escoamento superficial estimado, e uma análise sobre os resultados foi apresentada em um apêndice do trabalho.
QQ 3	A metodologia abordada é apresentada a partir de três etapas. A primeira detalha a preparação dos dados necessários para servirem de parâmetro para o modelo. Na segunda parte, a simulação do modelo é exposta através das equações e métodos utilizados no OARES, onde um apêndice é mencionado para explicar as interações entre os agentes. Entretanto, é mencionado que o OARES integra as bibliotecas Python, R e NetLogo, mas não são explicados os processos em cada plataforma e como foram integradas. Por fim, é realizada uma análise do modelo.
QQ 4	Os autores enfatizam as vantagens em se utilizar as ferramentas SMA e MCV, mas não mencionam as desvantagens. Eles mencionam que o uso de SMA no contexto hidrológico, por vezes é comparado com outras metodologias computacionais. Mas afirmam que os sistemas baseados em agentes possibilitam o uso de parâmetros fisicamente realistas, sem a necessidade de considerar uma grande quantidade de dados. Além disso, podem possuir um módulo de programação flexível, e obter uma economia no tempo computacional. E com relação ao MCV, os autores mencionam as vantagens em se utilizar modelos semidistribuídos, que geram uma modelagem satisfatória da região hidrográfica e são menos complexos que abordagens com estrutura distribuídas.
QQ 5	O SMA desenvolvido gerou uma modelagem hidrológica chuva-vazão e de erosão do solo sobre a bacia. Assim, a análise sobre a integração do SMA e do MCV foi realizada a partir dos resultados do modelo baseado em agentes.

O trabalho de BITHELL; BRASINGTON (2009) apresenta uma abordagem exploratória e explicativa, que objetiva investigar a influência de mudanças anuais no uso da terra que são induzidas por sociedades humanas, sobre a estrutura da floresta e seu desmatamento, bem como o seu impacto sobre a dinâmica hidrológica. Para isso, foi realizado um acoplamento de modelagens, humano, ecológico e de paisagem, que são sistemas complexos, não lineares, e multicomponentes. Os autores mencionam que o estudo não apresenta uma abordagem descritiva, ou seja, não possui capacidade para simular os processos reais de um sistema, não sendo recomendada a sua reprodução.

A metodologia do trabalho foi baseada em um modelo acoplado de três submodelos em pequena escala, incluindo um sistema multiagente referente a agricultura de subsistência, um modelo baseado no indivíduo para representar a dinâmica da floresta, e um modelo hidrológico distribuído espacialmente, para prever a umidade do solo e os fluxos de água na escala da bacia. O estudo foi voltado à uma pequena bacia hidrográfica, onde a simulação foi realizada em escala temporal de centenas a milhares de anos. Além disso, os submodelos foram definidos a partir do modelo digital de elevação (MDE) da região de estudo, o que gerou uma compatibilidade entre eles. Assim, o ambiente foi dividido em células regulares igualmente espaçadas. E para a modelagem foram utilizados dados do modelo hidrológico, topografia, e do sistema social da região.

Os resultados da modelagem foram explorados em uma seção do trabalho. Um primeiro resultado foi gerado a partir dos dados obtidos para o início da modelagem. Foi observado que em um ano hidrológico o clima da região é fortemente sazonal, com aproximadamente 90% da precipitação ocorrendo em uma época específica do ano. E esse fator está muito relacionado ao padrão de uso da terra, bem como cobertura florestal. Para examinar como a evolução do modelo florestal afeta o sistema hidrológico, os autores realizaram três experimentos, aumentando gradativamente o número de componentes envolvidos. Um primeiro experimento não incluiu famílias no modelo, apenas árvores. Dessa forma, foi possível compreender o comportamento da floresta, onde o pico se tornou constante ao longo do tempo, e os tipos diferentes de árvores possuíam comportamentos diferentes a longo prazo. Com a inclusão de uma família, os autores conseguiram examinar como o trabalho de busca por recursos foi afetado pelo desmatamento ao longo do tempo. Após, variou-se a dinâmica florestal e a população de famílias. Assim, foi analisada a dispersão e competição entre as famílias com relação à disponibilidade de recursos no ambiente.

Para os autores, dois desafios iniciais para o desenvolvimento da modelagem acoplada são: determinar as principais interações entre os sistemas, e entender a relação entre as escalas temporais em que os processos operam, bem como a escala temporal ideal para o modelo acoplado. Com relação aos SMA no contexto florestal, os autores enfatizam, através de uma breve revisão bibliográfica, o desafio de desenvolver um sistema que possua ambiente dinâmico. Isto é, que se leve em consideração o dinamismo dos sistemas acoplados, onde o SMA possua dados suficientes para gerar um comportamento similar ao real comportamento da floresta, que se modifica com o tempo e represente as variações geradas através das conexões entre os

sistemas, em particular, o sistema hídrico. Uma outra problemática é mencionada com relação a direção do acoplamento, onde é possível analisar o modelo quando a saída de um submodelo é utilizada como entrada de outro, mas não há feedback na direção oposta. Um dos problemas levantados é o que os autores chamam de problema de compatibilidade do modelo. Quando não ocorre a combinação correta entre os submodelos, o sistema pode conter sérios problemas de estabilidade. Os autores afirmam que o modelo acoplado desenvolvido no trabalho possui uma boa compatibilidade entre os submodelos, pois eles utilizam o código-fonte completo de cada submodelo, e contam com a flexibilidade dos sistemas multiagente e baseado em indivíduo, com relação as escalas espaciais. Mas existem ainda questões relacionadas ao escalonamento de tempo e a adoção adequada de escalas temporais.

O tempo de integração necessário entre os modelos é um outro desafio abordado. Dentre os três modelos, os autores constataram que os modelos hidrológico e de floresta possuem um alto custo de execução, sendo o modelo florestal o que gera um maior tempo de processamento. Esses problemas dificultam o experimento e análise do acoplamento dos modelos, sendo necessário gerar cenários previamente planejados e bem definidos. A validação do modelo acoplado com relação ao tempo, mostrou ser um grande desafio, pois o sistema apresenta uma vasta variação de componentes que se modificam em escala temporal, muitas vezes por longos períodos. Os autores comentam que uma possível solução seria considerar uma hipótese ergódica, entretanto outros desafios aparecem quando se considera essa possibilidade.

O trabalho de YANG et al. (2017) teve como intuito apresentar o desenvolvimento de uma modelagem integrada para a gestão de recursos hídricos. Mais precisamente, os autores desenvolveram um SMA homogêneo baseado no sistema fluvial eWater Source, e com estrutura de nó-link baseado no modelo SMDBRM. O modelo acoplado foi calibrado em cada região de SMDBRM, onde foi integrada uma ferramenta de autocalibração sequencial. O RRM foi utilizado para modelar e calibrar os escoamentos não medidos na bacia. Diversos modelos foram desenvolvidos separadamente para auxiliar na gestão de recursos hídricos da bacia Murray-Darling com área de aproximadamente 1 milhão de km^2. Esses modelos geraram respostas aos sistemas fluvial e chuva-vazão, incluindo projetos voltados ao desenvolvimento de uma modelagem integrada entre os modelos individuais. Com o intuito de auxiliar na diminuição dos desafios gerados nessa integração, e aumentar a consistência e clareza na modelagem, os autores apresentaram uma modelagem integrada baseada em agente homogênea.

Um modelo de sistema fluvial chamado eWater Source foi desenvolvido como uma plataforma de modelagem hidrológica nacional da Austrália para substituir modelos antigos e que não eram integrados. A partir dele, foi desenvolvido um modelo hidrológico conceitual diário denominado como SMDBRM, que representa o sistema fluvial através de uma abordagem nó-link, onde cada nó representa o final de uma rede fluvial e todos os nós são interconectados por links. Esse modelo utiliza dentre algumas técnicas para obter resposta hidrológica, modelos chuva-vazão conceituais para estimativa da contribuição do escoamento de bacias calibradas e não calibradas. Além de incorporar diferentes regras operacionais e de gestão para auxiliar no planejamento hídrico. A bacia foi dividida em 18 regiões utilizando o sistema do modelo

SMDBRM, e para cada uma delas foi construído um ou dois modelos individuais. O trabalho apresenta a arquitetura, as funcionalidades e a implementação da abordagem baseada em agente que integra os modelos individuais de cada região da bacia. E ainda, para otimizar o tempo computacional, foram utilizadas técnicas de computação paralela.

Segundo os autores, a complexidade do sistema foi reduzida pela homogeneidade do SMA, onde os agentes foram modelados por um mesmo modelo de sistema fluvial. Todos os agentes possuem a mesma estrutura conceitual de modelagem (governada por processos físicos e regras de gerenciamento), e escalas temporal e espacial, mas variam seus parâmetros conforme resultados da calibração. A partir de um arquivo em formato log, a simulação foi registrada. Além disso, um controlador de comportamento dos agentes permitiu controlar as regiões de forma direta, pela modificação do arquivo XML do projeto ou das linhas de comando programadas. Com isso, foi possível analisar diferentes modificações e consequências das relações dos agentes com o comportamento do sistema. Além disso, o SMA possibilitou a análise do feedback de regiões de jusante a montante. Assim, através das interações dos agentes se tornou mais evidente a disponibilidade e necessidade de recursos hídricos entre as regiões. Através do processo de autocalibração do sistema, foi possível calibrar os modelos regionais separadamente. Com isso, o tempo e a complexidade de processamento diminuíram. Além disso, por ser um modelo homogêneo, os autores afirmam que ele supera parcialmente algumas dificuldades enfrentadas, em comparação ao sistema heterogêneo. Um exemplo disso são as diferenças nas escalas espaciais e temporais, que não ocorrem no sistema homogêneo. Os autores analisaram o modelo considerando 477 nós de modelagem e links do SMDBM. Os nós foram usados para calibração e validação do modelo. A calibração e a validação envolveram dados de fluxo diário observados. Os resultados do modelo mostraram um tempo de processamento satisfatório e um desempenho bom em quase todas as regiões da bacia. Mas o desempenho e as estatísticas de validação não foram satisfatórios em algumas regiões. Os autores mencionam que a estrutura de modelagem pode ser reproduzida e implementada para outra bacia, desde que se utilize o software de origem.

O trabalho foi desenvolvido para tentar sanar alguns dos desafios encontrados a respeito da modelagem integrada da bacia, que contou com diversos tipos de modelos para diferentes regiões. Alguns desses desafios foram: o alto custo computacional obtido; os diferentes conceitos e escalas espaciais e temporais adotadas em cada modelo; inconsistências com relação a falta de capacidade de calibração por parte de alguns modelos; e dificuldade de colaboração entre as autoridades envolvidas devido a análise e compreensão das diversas modelagens apresentadas. Sobre a dinâmica dos sistemas socioambientais acoplados, os autores afirmam que a complexidade é muito grande, devido à não linearidade e aos comportamentos emergentes apresentados. Mas afirmam que a abordagem de sistema multiagente é uma das formas de reverter esse problema, pois reduz a complexidade do sistema. Em relação aos resultados do modelo, os autores mencionam que um desafio foi o número limitado de medidores de calibração, e má qualidade e quantidade alta de registros ausentes dos dados de fluxo observados. Segundo eles, esses recursos afetam diretamente o desempenho do modelo. O que consequentemente interfere

na validação do mesmo.

O trabalho de MAJUMDAR; SHUKLA; MAITI (2018) apresentou um SMA para modelar e simular a chuva-vazão e erosão do solo da bacia hidrográfica de Asan, em Uttarakhand, Índia. Foram utilizados dados disponíveis e monitorados da região hidrológica, o método Soil Concervation Service (SCS) para estimar o escoamento direto, e a ferramenta de plataforma cruzada de código aberto Open Agent Based Runoff and Erosion Simulation (OARES) para simular e analisar os dados hidrológicos. O trabalho divide a metodologia em três fases: preparação dos dados; simulação do modelo; e análise quantitativa. Na preparação de dados, são gerados os parâmetros necessários para a simulação do modelo. A simulação ocorre através do modelo concentrado OARES, a qual integra as bibliotecas Python, R e NetLogo para fornecer uma interface para geração automática de parâmetros de entrada. E os resultados são observados através de análises estatísticas sobre os dados obtidos.

Para os autores, existem quatro fatores principais que afetam o escoamento, sendo eles: volume e intensidade de chuva; tipos e propriedades do solo; inclinação do relevo; e padrões de uso e manejo do solo. Então para a modelagem foi preciso obter dados meteorológicos disponíveis, mapas de uso do solo, e o MDE. Além disso, através de uma equação empírica, o escoamento e a erosão são estimados pela integração do SCS e método do número de conservação do solo (Curve Number - CN), ou ainda, método SCS CN.

Os autores apresentam uma série de análises sobre o trabalho proposto. A bacia apresentou diferentes classes de uso do solo. Para gerar uma classificação supervisionada dos mapas de uso do solo, foram analisadas a variância e covariância das identificações de cada classe, com base no uso do Classificador de Máxima Verossimilhança sobre as imagens Landsat 8 disponíveis. Além disso, a simulação da vazão foi realizada através da relação entre a precipitação e escoamento direto, dos quais foram ajustados por meio de um método de regressão sobre o gráfico de dispersão. Com a precipitação média o ajuste de regressão se mostrou satisfatório, já com anos de baixa precipitação o ajuste se mostrou inadequado para fornecer a relação chuva-vazão. O escoamento foi estimado usando o total de chuva gerada através das gotas de chuva consideradas como agentes e que interagiram no SMA. Na análise dos autores, houveram algumas variações nas estimativas de escoamento. Segundo eles, elas foram causadas por parte das oscilações geradas por mudanças nas condições ambientais, que consequentemente geraram variações nas precipitações.

A simulação da erosão no solo foi gerada a partir do OARES e de três parâmetros: gostas de chuva; elevação; e altura da água. Através de uma comparação da modelagem do SMA com modelos hidrológicos convencionais, os autores constataram que os dados obtidos de vazão se mostraram satisfatórios. Mas uma diferença entre eles é que nos modelos convencionais os dados de vazão simulados são obtidos para um local de saída da região, enquanto o modelo OARES gera a mesma vazão para toda a região. Ao final do artigo, os autores comentam sobre a necessidade de melhorar o modelo e realizar o teste de significância estatística. Eles apenas recomendam ferramentas que resolvam esse problema. Para os autores, a plataforma é considerada genérica, sendo possível sua reprodução para outras bacias.

Um desafio mencionado foi o de ser capaz de compreender as mudanças hidrológicas que ocorrem na bacia, tendo em vista as ações antrópicas geradas na superfície terrestre. Muitos dos resultados considerados inadequados, foram associados às mudanças bruscas nas séries anuais de precipitação. Isso, segundo os autores teve relação direta com as modificações na estrutura ambiental. Assim, foi menciona a necessidade de considerar o uso e cobertura da terra um parâmetro de entrada importante do modelo. Além disso, abordaram as dificuldades geradas ao utilizar RRMs distribuídos tradicionais que, muitas vezes, necessitam de uma grande quantidade de dados, uma configuração complexa e um alto custo computacional, principalmente na etapa de calibração. Dessa forma, ressaltam as vantagens em se utilizar modelos semidistribuídos, que reduzem a complexidade da modelagem hidrológica.

Segundo os autores, uma das maiores dificuldades no desenvolvimento da ferramenta OARES foi utilizar o MDE no sistema multiagente. O MDE foi reamostrado na plataforma NetLogo com a abordagem do vizinho mais próximo. Para estudos que exijam uma alta precisão de medições, essa abordagem talvez prejudique os resultados do modelo. Além disso, a plataforma OARES é considerada concentrada, ou seja, sua região utiliza e fornece dados que correspondem a toda região, gerando um comportamento homogêneo.