



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente para a Dinâmica de Uso da terra

Carolina Gonçalves Abreu

Dissertação apresentada como requisito parcial
para conclusão do Mestrado em Informática

Orientadora
Prof.^a Dr.^a Célia Ghedini Ralha

Brasília
2012

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Mestrado em Informática

Coordenador: Prof. Dr. Mauricio Ayala Rincón

Banca examinadora composta por:

Prof.^a Dr.^a Célia Ghedini Ralha (Orientadora) — CIC/UnB
Prof. Dr. Alexandre Zaghetto — CIC/UnB
Prof. Dr. Bruno Luigi Macchiavello — CIC/UnB
Prof. Dr. Ricardo Bomfim Machado — IB/UnB

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Abreu, Carolina Gonçalves.

Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente para a Dinâmica de Uso da terra / Carolina Gonçalves Abreu. Brasília : UnB, 2012.

186 p. : il. ; 29,5 cm.

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

1. Sistemas Multiagente, 2. Framework de Simulação, 3. Mudanças no Uso e Cobertura da terra

CDU 004

Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília-DF — Brasil

Dedicatória

Às minhas avós Pureza e Celeste, exemplos de tudo o que um dia eu quero ser.

Agradecimentos

Agradeço

A Deus, pela oportunidade da vida e do estudo edificante. À família de Atualpa B. Lima, pelo carinho em todos os momentos.

A toda a minha família pelo apoio incondicional e pelo incentivo constante. Aos meus pais, Carla e Wilson Abreu, por me ensinarem o valor dos livros. Às minhas irmãs Gabriela, Mariana e Fernanda, por relevarem a minha rabugice durante todo o processo e por se ocuparem de todas as tarefas que me cabiam. Às tias, tios, avós, avôs, primos, primas, dindas, parentes e agregados: muito obrigada.

À minha amiga e orientadora Dra. Célia Ghedini Ralha, por ter acolhido e acreditado no projeto e pela confiança depositada em mim, permitindo que, com liberdade, o trabalho fosse construído. Agradeço todo o apoio e conselhos ao longo do processo.

Ao amigo Cassio Couto, pela parceria em cada passo da pesquisa e por me trazer de volta ao chão a cada idéia mirabolante. Obrigada por ter sido meu braço direito durante esse desafio.

Aos professores Dr. Alexandre Zaghetto e Dr. Bruno Luigi Macchiavello por toda a orientação e estímulo. Muito obrigada por me instigarem a querer sempre um pouco mais da pesquisa.

Ao Dr. Ricardo Machado, do Instituto de Biologia, que com presteza colaborou na elaboração do trabalho. Obrigado pelas palavras de experiência e incentivo.

Aos Professores Dr. Pushpa Narayan Rathie e Alan Ricardo da Silva, do Departamento de Estatística da UnB, por identificarem novos rumos para o trabalho em curso.

À Universidade de Brasília e ao Departamento de Ciência Computação, onde encontrei um ambiente acolhedor e bem estruturado.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, pelo apoio prestado ao longo do curso. Aos Srs. Fernando Marques e Claudio Liberman, pela liberdade conferida e por toda a confiança depositada. À equipe do Relatório de Qualidade do Meio Ambiente, muito obrigada!

Aos amigos Álvaro, Bernardo, Giovana, Jailton, João, Lucia, Marcos, Vitoria, Wátilla e Tereza, pelas doses diárias de estímulo e por compartilharem as minhas alegrias e angústias. Obrigada por contribuírem para o meu crescimento e por tornarem-no bem divertido.

Aos amigos Mariana, Breno, Clarissa, Lary, Lam, Bi, Tê, Lu, Ti, Tat, Dri, Mi, Paulo, Mila, Graça, Roberta, Leo, Phil, Marcelinho, Dani e tantos outros queridos. Obrigada pela indulgência com a minha ausência nos últimos tempos. À Brandi, Adele, Morrissey, Zach, Camelo e Florence: eu não conseguia sem vocês.

“Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Constituição da República Federativa do Brasil de 1988

Resumo

Mudanças na cobertura e no uso da terra estão entre as mais impactantes e difusas fontes de alteração na superfície terrestre. Para atenuar os problemas advindos da intensificação desses processos, é necessário implementar políticas que se fundamentam em um melhor entendimento da dinâmica das mudanças no uso e cobertura da terra. A modelagem desses sistemas pode contribuir para a investigação de cenários ambientais mais favoráveis, visando ao equilíbrio entre políticas de conservação e o avanço das atividades de uso da terra para sua exploração econômica. O trabalho propõe uma ferramenta de simulação computacional denominada MASE, um sistema multiagente para simulação ambiental, que fornece o arcabouço necessário para a simulação de modelos configuráveis pelo usuário, ao permitir testes de hipóteses e investigação de relações entre as variáveis. A abordagem de sistemas multiagente permite representar os processos de transformação do uso e cobertura da terra por meio de agentes autônomos com comportamentos heterogêneos, que competem e interagem entre si e com o ambiente. É a metáfora natural para representar a complexidade dos elementos naturais e das pressões antrópicas, e suas relações. A ferramenta pode ser sintetizada como um SMA híbrido de coordenação competitiva. A contribuição principal da ferramenta consiste na flexibilidade de configuração do modelo e da possibilidade de adoção de vizinhanças variáveis. O potencial da ferramenta MASE é ilustrado pelo estudo de caso desenvolvido no bioma Cerrado, considerado um *hotspot* da biodiversidade mundial e uma das últimas fronteiras agrícolas do mundo. Os detalhes da arquitetura e protótipo são seguidos pela apresentação dos experimentos que servem de teste para as funcionalidades implementadas. Os resultados obtidos foram muito positivos, com boa representação espacial geral e emergência de padrões. As limitações da ferramenta são discutidas e as direções de pesquisas futuras são apresentadas.

Palavras-chave: Sistemas Multiagente, Framework de Simulação, Mudanças no Uso e Cobertura da terra

Abstract

Land Use/Cover changes are among the most striking and diffuse sources of alteration of the Earth's land surface. To mitigate the problems arising from the intensification of these processes, it is necessary to implement policies founded upon a better understanding of the land use/cover changes dynamics. The modeling of these systems may lead to the investigation of more benefic environmental scenarios, aiming the balance between conservation policies and the advance of land use activities for its economic exploitation. This work proposes a computational simulation tool called MASE, a multiagent system for environmental simulation, which provides the framework needed to simulate the model configured by the user and allows hypothesis testing and the investigation of relations between variables. The multiagent system approach allows us to represent the land use/cover transformation through independent agents with heterogeneous behaviors that compete and interact with each other and the environment. It is a natural metaphor to represent the complexity of the natural elements and human pressures, and their relationships. The tool can be synthesized as a SMA Hybrid coordination competitive. The main contribution of the tool consists of the configuration flexibility of the model, the mechanism of decision-making agents and the possibility of adopting changing neighborhood. The potential of the MASE tool is illustrated through a study case developed in the Cerrado, considered a global biodiversity *hotspot* and one of the world's last agricultural frontier. The details of the architecture and prototype are followed by the presentation of the experiments that serve to test the implemented functionalities. The results were very positive, with good general spatial representation and emergence of patterns. The tool's limitations are discussed and directions for further research are presented.

Keywords: Multiagent Systems, Simulation Framework, Land Use and Land Cover Change

Abreviaturas

AAII - *Australian Artificial Intelligence Institute.*

ABM - *Agent Based Models.*

ACC - Canal de Comunicação de Agentes (*Agent Communication Channel*).

AID - Identificador do Agente (*Agent Identifier*).

AMS - *Agent Management System.*

AOSE - *Agent Oriented Software Engineering.*

AP - Plataforma de Agente (*Agent Platform*).

API - *Application Programming Interface.*

BDI - *Believe Desire Intention.*

BPM - *Business Process Management.*

CA - *Cellular Automata.*

CE - Conhecimento de Especialistas.

CIRAD - *French Agricultural Research Centre for International Development.*

CLUE - *The Conversion of Land Use and its Effects.*

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

ConfigAgent - Agente de Configuração.

CORMAS - *Common-Pool Resources and Multi-agent Systems.*

CSR - Centro de Sensoriamento Remoto.

CT - Tabela de Contêineres (*Container Table*).

DC - Dados derivados de Censo.

Dinamica-EGO - *Dinamica Environment for Geoprocessing Objects.*

DF - Facilitador de Diretórios (*Directory Facilitator*).

DF - Distrito Federal.

EL - Experimentos em Laboratório.

ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*.

FFT - *Fast Fourier Transform*.

FIPA - *Foundation for Intelligent Physical Agents*.

FIPA ACL - *FIPA Agent Communication Language*.

FIPA SL - *FIPA Semantic Language*.

FSM - *Finite State Machine*.

GADT - *Global Agent Descriptor Table*.

GE - Gerente Espacial.

GGRID - Gerente de GRID.

GT - Gerente de Transformação.

ha - Hectare.

IA - Inteligência Artificial.

IAD - Inteligência Artificial Distribuída.

Ibama - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBM - *Individual-Based Models*.

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Inpe - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

JADE - *Java Agent DEvelopment framework*.

JVM - Máquina Virtual Java (*Java Virtual Machine*).

KSE - *Knowledge Sharing Effort*.

LANDSAT - *LAND SATellite*.

LCM - *Land Change Modeler*.

LGPL - *GNU Lesser Public License*.

LUCC - *Land Use Cover Change*.

m - metro.

MMA - Ministério do Meio Ambiente.

MTP - Protocolos de Transporte de Mensagens (*Message Transport Protocols*).

MTS - Sistema de Transporte de Mensagens (*Message Transport Service*).

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*.

ODD - *Overview Design concepts and Details*.

PASSI - *Process for Agent Societies Specification and Implementation*.

PDI - Processamento Digital de Imagens.

PDOT - Plano Diretor de Ordenamento Territorial.

PDS - Processamento Digital de Sinais.

PDT - *Prometheus Design Tool*.

PEAS - *Performance Environment Actuators Sensors*.

PPP - Próxima Posição Provável.

RDS - Região de Desenvolvimento Sustentável.

RGB - *Red Green Blue*.

RMI - *Java Remote Method Invocation*.

RPG - *Role-Playing Game*.

SBC - Sociedade Brasileira de Computação.

SBSI - Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação.

SEDHAB - Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano.

SIG - Sistemas de Informação Geográfica.

SMA - Sistema Multiagente.

SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação.

SR - Sensoriamento Remoto.

TILab - *Telecom Italia Lab*.

UC - Unidade de Conservação.

UCPI - Unidades de Conservação de Proteção Integral.

UF - Unidade Federativa.

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais.

UnB - Universidade de Brasília.

UTM - *Universal Transverse Mercator*.

ZEE - Zoneamento Ecológico Econômico.

Sumário

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Caracterização do Problema	2
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Conteúdo e Organização do Documento	5
2 Uso e Cobertura da terra	7
2.1 Conceitos e Nomenclatura	8
2.2 Modelagem e Simulação	9
2.2.1 Modelagem da Dinâmica do Uso e Cobertura da terra	13
2.2.2 Tendências na Pesquisa LUC	19
2.2.3 Protocolo Padrão ODD	21
2.3 O Bioma Cerrado	23
2.3.1 Caracterização do Cerrado	24
2.3.2 Cobertura e Uso da terra no Cerrado	25
2.4 Sensoriamento Remoto	31
3 Sistema Multiagente	36
3.1 Agente Inteligente	36
3.2 Fundamentos de SMA	37
3.2.1 Ambientes	39
3.2.2 Comunicação	40
3.2.3 Arquiteturas	41
3.2.4 Coordenação	43
3.2.5 Metodologia	45
3.3 Padrões e Ferramentas	47
3.3.1 FIPA	47
3.3.2 Plataforma JADE	50
3.4 Aplicações de SMA	52
3.4.1 SMA e Ecologia	53

4	Trabalhos Correlatos	55
4.1	Comparação entre as Ferramentas	55
4.2	Aplicações de Ferramenta e Modelos	62
5	Proposta do Trabalho	64
5.1	Caracterização Empírica	66
5.2	Modelo de Cobertura e Uso da terra para o Cerrado	70
5.2.1	Visão Geral	70
5.2.2	Conceitos de Projeto	73
5.2.3	Detalhes	76
5.3	Ferramenta MASE	88
5.3.1	Especificação do Sistema e Projeto de Arquitetura	89
5.3.2	Detalhamento da Infraestrutura Computacional	107
6	Estudo de Caso e Resultados	110
6.1	Estudo de Caso para o Distrito Federal	110
6.1.1	Parâmetros da Simulação	112
6.1.2	Classes de Uso da terra no DF	113
6.1.3	Variáveis Proximais	114
6.1.4	PDOT	115
6.2	Descrição dos Experimentos de Simulação	119
6.2.1	Experimento 1	120
6.2.2	Experimento 2	124
6.2.3	Experimento 3	134
6.2.4	Experimento 4	136
6.3	Discussão dos Resultados	138
6.3.1	Características Gerais	138
6.3.2	Quantificação da Mudança	142
6.3.3	Alocação da Mudança	144
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	145
7.1	Trabalhos Futuros	147
	Referências	151
A	Processamento Digital de Imagens	162
A.1	Fundamentos da Imagem	163
A.2	Realce de Imagem	164
A.2.1	Filtragem no Domínio da Frequência	165
A.2.2	Filtragem no Domínio Espacial	167

Lista de Figuras

2.1	Visão Geral de um modelo de simulação	11
2.2	Esquema do estudo da simulação	12
2.3	Regras de vizinhança a partir da célula de referência.	15
2.4	Construções de vizinhança radial.	15
2.5	Exemplo de cadeia de Markov com 3 estados.	16
2.6	Exemplo de campo matricial de autômato celular	17
2.7	Estrutura <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	18
2.8	Os três blocos do protocolo ODD	22
2.9	Mapa dos Biomas Brasileiros (IBGE).	24
2.10	Distribuição espacial de áreas com cobertura vegetal natural e antrópica	27
2.11	Modelo conceitual das pressões socioeconômicas por carne	28
2.12	Distribuição espacial das classes de uso da terra no bioma Cerrado	30
2.13	Exemplo de carta imagem	35
3.1	Agentes com registro de estado	38
3.2	Visão Geral de um SMA	39
3.3	Fluxo de dados e controle nas arquiteturas em camada.	43
3.4	Metodologias AOSE	45
3.5	Estrutura da Mensagem FIPA	48
3.6	Modelo de Referência FIPA, da plataforma de agentes.	50
3.7	Principais elementos arquiteturais JADE	51
3.8	Diagrama dos elementos da arquitetura JADE	52
4.1	Estrutura tridimensional para avaliação de ferramentas	57
4.2	Interfaces das ferramentas de simulação.	58
5.1	Visão Geral do propósito da ferramenta MASE.	65
5.2	Identidade da ferramenta MASE	66
5.3	Parametrização dos agentes MASE	68
5.4	Diagrama da estrutura conceitual do modelo.	71
5.5	Fluxograma do modelo MASE	74
5.6	Mapa de entrada da área de estudo.	77
5.7	Exemplos de imagens de entrada das variáveis proximais.	78
5.8	Diagrama do modelo de uso da terra	79
5.9	Filtro Gaussiano utilizado na geração das imagens	82
5.10	Variável proximal <i>Edificações</i>	82
5.11	Parte ampliada da variável proximal <i>Edificações</i>	83
5.12	Unidade de Conservação: inibe o uso antrópico.	83

5.13	Mapas T e T_{aux} resultantes	84
5.14	Ilustração do processo de deslocamento de um agente explorador	85
5.15	Arquitetura do Sistema MASE.	89
5.16	Organização em níveis do Sistema MASE.	91
5.17	Detalhamento dos tipos implementados para as classes de agentes	93
5.18	Diagrama de interação/comunicação entre os agentes.	99
5.19	Janela Principal da Ferramenta MASE.	101
5.20	Proposta de Interface de Configuração da Ferramenta MASE.	102
5.21	Projeto de Janela de Simulação	103
5.22	Classes implementadas da ferramenta MASE (Versão 1.0).	105
5.23	Diagrama de classes dos agentes no MASE.	106
6.1	Unidades de Conservação do DF e entorno.	111
6.2	Imagens com a classificação da cobertura da terra no DF. Fonte: Ibama.	112
6.3	Resolução espacial da célula utilizada para o MASE.	113
6.4	Distribuição das classes de uso da terra para o DF.	114
6.5	Máquina de estados determinística para o estado de conservação da terra.	115
6.6	Variáveis proximais que configuram o ambiente no DF.	116
6.7	Composição das <i>layers</i> que caracterizam o ambiente físico do DF.	117
6.8	Detalhes da Macrozona Rural - PDOT DF.	118
6.9	Classificação do PDOT utilizada para os agentes agricultor e pecuarista.	119
6.10	Identificação das três áreas simuladas no Experimento 1.	120
6.11	Conjunto de imagens para os três recortes simulados no Experimento 1.	121
6.12	Detalhe da simulação resultante do Experimento 1.	122
6.13	<i>Grid</i> de simulação do Experimento 2.	125
6.14	Visão do conjunto de imagens pós-simulação do Experimento 2.	127
6.15	Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 0 a 6.	131
6.16	Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 7 a 12.	132
6.17	Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 13 a 17.	133
6.18	Detalhes do recorte 13 e suas variáveis proximais.	134
6.19	Comparação dos resultados dos Experimentos 1, 2 e 4, em porcentagem.	139
7.1	Módulo de Lógica Fuzzy a ser implementado em trabalhos futuros.	148
A.1	Exemplo de imagem digital.	164
A.2	Curva em preto decomposta em suas componentes senoidais.	165
A.3	Distribuição gaussiana unidimensional	168
A.4	Forma da distribuição Gaussiana bidimensional.	168
A.5	Filtragem Gaussiana em representação do Distrito Federal.	169

Lista de Tabelas

2.1	Dados sobre a cobertura da terra do Cerrado - ano de referência 2008	26
2.2	Área (em hectares) ocupada pelas diferentes classes de uso da terra	29
2.3	Características e usos das bandas espectrais do LANDSAT 7	34
3.1	Parâmetros das mensagens ACL	48
4.1	Resolução e extensão nas três dimensões	56
4.2	Seis Níveis da complexidade das decisões humanas	56
4.3	Características gerais e tecnologia das ferramentas	60
4.4	Características espaciais das ferramentas	60
4.5	Características temporais e de decisão humana das ferramentas	61
5.1	Parametrização das características comportamentais dos agentes humanos.	69
5.2	Entidades e variáveis de estado do modelo MASE.	73
5.3	Relações de estímulo entre as variáveis proximais	81
5.4	Descrição das Classes de Agentes Gerentes com o comportamento.	96
5.5	Descrição das Classes de Agentes de Serviço e Agentes Operacionais	97
5.6	Classificação dos comportamentos implementados na ferramenta MASE . .	108
6.1	Resultados do Experimento 1 para a simulação dos 3 recortes.	123
6.2	Síntese dos resultados do Experimento 1 para os 3 recortes.	124
6.3	Resultados do Experimento 2 para a simulação dos 17 recortes.	128
6.4	Síntese dos resultados do Experimento 2 para os 17 recortes.	129
6.5	Resultados do Experimento 2, desconsiderando os recortes 4, 7 e 10.	130
6.6	Resultados do Experimento 2 para a simulação dos 17 recortes.	135
6.7	Resultados do Experimento 4 para a simulação dos 17 recortes.	137
6.8	Resultados do Experimento 4	138
6.9	Características gerais e tecnologia das ferramentas	141

Capítulo 1

Introdução

Conhecer a dinâmica do uso da terra é relevante em tempos de discussão acerca do desenvolvimento sustentável. Investigar as implicações ambientais, sociais e econômicas do uso da terra já é uma evolução das correntes de pesquisa, uma vez que até meados dos anos 80, os estudos dessa natureza restringiam-se basicamente à identificação da cobertura da terra.

Essa visão integrada de uso da terra, que se consolidou na pesquisa das últimas décadas, percorreu caminho segregado ao do planejamento ambiental. O planejamento ambiental, mesmo antes do termo ser disseminado, teve sua execução pautada para servir aos interesses da expansão urbana, da exploração agropecuária para o extrativismo mineral, para a silvicultura, entre outros. Assim, firmou-se na classe com o poder de tomar decisões, a imagem do mundo como um conjunto estruturado de padrões espaciais, a serem identificados, analisados e classificados, de modo a facilitar a intensificação do uso dos recursos ambientais nele disponíveis (Silva, 1995a).

Especialmente em relação às questões de uso e ocupação da terra, Santos e Silveira (2004) advertem que tais usos estão intrinsecamente relacionados à produção de informação. Daí a necessidade de se obter informações de qualidade, de reconhecer os centros produtores de informação e de identificar o público-alvo. Quem decide qual uso será dado à informação é o público-alvo, representado pelo estado, pelas empresas e pela sociedade. Há então que se considerar a relação entre duas potencialidades: a do conhecimento técnico e a da política, mediante os usos da informação.

Embora as preocupações ambientais estejam, atualmente, no foco de inúmeros governos, o descompasso entre a informação produzida e as ações políticas efetivadas continua evidente na área ambiental. Observa-se, nitidamente, que os sistemas tradicionais de tomada de decisão acerca das mudanças na cobertura e no uso da terra tendem a separar os fatores ambientais do plano político e de planejamento, não os incluindo de maneira significativa, seja na formulação de políticas públicas, seja na resolução de questões cruciais de gestão ambiental.

Dessa maneira, uma miríade de informações ambientais que são produzidas por atores técnicos não têm o seu potencial explorado para embasar a tomada de decisão. As recentes tentativas de alterações no Código Florestal brasileiro (BRASIL, 1965) demonstram que os efeitos das políticas no ambiente mal são identificados, avaliados ou mesmo considerados no processo decisório.

1.1 Caracterização do Problema

Um exemplo claro do distanciamento entre a existência de informação pra embasar a tomada de decisão e a ação real é o bioma Cerrado. O Cerrado é uma das mais ricas savanas do mundo, sendo o segundo bioma brasileiro mais rico em biodiversidade. O bioma é considerado um *hotspot* da biodiversidade mundial, o que demanda especial atenção para a conservação da riqueza biológica frente às ameaças de destruição. Entretanto, as taxas de desmatamento no Cerrado têm sido historicamente superiores às da floresta Amazônica e o esforço de conservação do bioma é muito inferior ao da Amazônia (Klink e Machado, 2005). Segundo dados do Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) (2009), o bioma acumula uma perda de cerca de 47,8% de sua cobertura original até 2008. Especialistas apontam que existe um esforço de conservação muito inferior às reais necessidades do bioma. Somente 2,2% do território ocupado pelo Cerrado é legalmente protegido (Klink e Machado, 2005).

Essas alterações advêm principalmente da substituição da vegetação natural do Cerrado por áreas destinadas às atividades agropecuárias (Sano et al., 2008), sendo que as principais atividades desenvolvidas na região concentram-se no plantio de soja, de eucalipto, de pastagens plantadas, no corte de espécies lenhosas nativas para produção de carvão vegetal e, em regiões específicas, na expansão urbana. A intensidade e rapidez do processo de devastação do Cerrado requerem ações urgentes e fizeram com que Klink e Machado (2005) apontassem a conciliação entre o uso da terra e a conservação desse bioma, como principal desafio.

As mudanças no uso e na cobertura da terra são consideradas uma das principais fontes de alteração recente na superfície terrestre (Houet et al., 2010). A isso, acrescenta-se o fato de o Cerrado ser considerado uma das últimas fronteiras de produção agrícola do mundo e de haver muito pouco conhecimento da população em geral, e dos tomadores de decisão, acerca da riqueza e importância ecológica desse bioma. Estes e outros fatores, alinhados à postura política vigente (visando à exportação de produtos agrícolas), resultam na crescente intensidade e rapidez do processo de devastação do bioma, apesar do também crescente aumento de conhecimento teórico e prático fornecido pelos centros produtores de informação. Dessa maneira, embora os estudos científicos sobre estas questões estejam emergindo, eles são principalmente estudos aprofundados em áreas limitadas. Portanto, o desafio é sintetizar as informações econômicas e ecológicas disponíveis, com a finalidade de fornecer uma base racional para as decisões políticas do governo e o fomento tecnologia (Smith et al., 1998).

Dessas premissas surge um forte interesse pela produção de informação acerca da dinâmica do uso e da cobertura da terra. Os estudos nessa área têm se distanciado das propostas iniciais de detecção e identificação das mudanças no uso e cobertura da terra, para a modelagem de sistemas para a predição de mudanças na dinâmica e para a exploração de cenários alternativos para a gestão e planejamento (Verburg et al., 2004). Entender a dinâmica do uso e cobertura da terra no Cerrado pode contribuir para a investigação de cenários mais favoráveis para a manutenção da cobertura vegetal, visando ao equilíbrio entre políticas de conservação e o avanço das atividades de uso da terra para exploração econômica, e assim, subsidiar pesquisas ecológicas ou fomentar discussões para a formulação de políticas públicas.

A partir desse contexto, o problema é entender a dinâmica do uso e cobertura da terra no Cerrado para gerar informação para a gestão. Tal necessidade envolve o entendimento da conectividade entre a sociedade e o ambiente, dos elementos do ecossistema e suas interações e níveis de organização nas diferentes escalas, bem como dos fatores sociais, econômicos e políticos e suas implicações. Essa problemática resulta em uma atividade complexa e dinâmica (Barreteau et al., 2007), o que justifica o interesse pelo uso de técnicas computacionais de simulação.

Nesse contexto, as simulações são vistas como instrumentos de aquisição do conhecimento e de apoio à decisão. Modelos de simulação são um dos métodos do portfólio de ferramentas e técnicas disponíveis para desvendar a dinâmica dos sistemas de uso da terra (Verburg, 2006). Pela tentativa de reproduzir os mecanismos da realidade, os modelos de simulação podem mostrar de que modo as escolhas de como a terra é explorada afetam as direções futuras do sistema retratado. Na área da Ciência da Computação, a subárea da Inteligência Artificial (IA), especialmente a Inteligência Artificial Distribuída (IAD), com ênfase na abordagem de Sistema Multiagente (SMA) (Wooldridge, 2009) surge como técnica candidata à resolução de problemas de modelos de simulação dinâmica.

1.2 Justificativa

A Ciência da Computação oferece hoje à Ecologia e demais áreas do conhecimento uma série de ferramentas, tais como os Sistemas de Informação Geográfica (GIS), bancos de dados, repositórios de informações ambientais e até realidade virtual para a simulação de ambientes. Tudo isso de maneira muito mais acessível que a existente em alguns anos atrás. Potentes ferramentas computacionais estão à disposição de usuários comuns, que por sua vez, têm formulado questionamentos cada vez mais demandantes computacionalmente.

Ao permitir que os pesquisadores lidem com a complexidade mais diretamente, a computação oferece novas maneiras de “fazer ecologia”, que complementam as abordagens tradicionais (Green et al., 2006). Entretanto, muitas vezes ecólogos enfrentam dificuldades para usufruir desse meio, uma vez que nem sempre as ferramentas analíticas disponíveis correspondem à escala de perguntas que são formuladas. Outras vezes, as ferramentas limitam sobremaneira a capacidade de extrapolar os resultados da pesquisa. Técnicas baseadas no comportamento vivo de entidades, como as técnicas de SMA, oferecem ao pesquisador a oportunidade de trabalhar com metáforas já conhecidas, como os agentes que representam elementos com características e comportamentos familiares.

O SMA possibilita a representação do conhecimento e a utilização de técnicas de raciocínio de agentes heterogêneos que interagem entre si e com o ambiente (Matthews et al., 2007). Segundo Bousquet e Le Page (2004), a abordagem de SMA vem sendo utilizada para apoiar tanto a discussão de conceitos como o entendimento das relações entre as ciências ambientais e sociais. Esse método lida com a autonomia dos agentes, ou seja, com a capacidade que um agente deve ter de exercer controle sobre suas próprias ações. Essa característica justifica o uso desse tipo de tecnologia na representatividade para fins de organização de sistemas constituídos por interações entre diversos agentes de forma complexa e racional. A relação entre os processos biofísicos e socioeconômicos pode ser representada pela dinâmica entre agentes computacionais (Weiss, 2000).

Apesar das vantagens de modularidade e abstração, elementos chave para se lidar com a complexidade inerente aos cenários naturais, a abordagem de SMA possui limitações e difíceis desafios. Primeiramente, há a complexidade na formulação, descrição e alocação do problema entre os agentes, bem como da síntese dos resultados da ação do SMA. Há que se estabelecer mecanismos de consenso e coordenação dinâmica das atividades entre agentes que, muitas vezes, apresentam objetivos distintos, além de desconhecidos do resto do grupo de agentes. Tipicamente, as decisões são tomadas com base em informações locais, não sendo possível antever o efeito do conjunto de decisões no comportamento global do sistema. Mesmo assim, é necessário estabelecer mecanismos que tentem garantir que os agentes vão agir de maneira coerente na tomada de decisão. Mais ainda, é impossível antecipar como circunstâncias não previstas vão impactar a ação de um agente, ou como mensurar objetivamente parâmetros de utilidade do sistema. Além dessas questões associadas ao projeto, são intensas as demandas por recursos computacionais em SMA aplicado em contextos ambientais.

O trabalho desenvolvido visa à aplicação das técnicas computacionais na modelagem de uso da terra, por intermédio da construção de uma ferramenta de simulação que busca solucionar alguns dos desafios clássicos do SMA. Para isso, os objetivos da pesquisa são apresentados na Seção 1.3.

1.3 Objetivos

É objetivo geral desse trabalho desenvolver uma ferramenta computacional de simulação, baseada na abordagem de SMA, para analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra, utilizando como estudo de caso o bioma Cerrado, de modo a contribuir para a exploração de cenários alternativos para auxílio às pesquisas ecológicas e à tomada de decisão dos gestores ambientais.

São objetivos específicos do trabalho:

1. Modelar a dinâmica de uso da terra do Cerrado por meio de agentes que descrevam as interações complexas em seus comportamentos e que interajam entre si e com o ambiente;
2. Integrar à abordagem de SMA a utilização de imagens georreferenciadas classificadas, provenientes do sensoriamento remoto, como meio de auxiliar no processo de modelagem espacialmente explícita;
3. Propor uma ferramenta de simulação flexível ao usuário, que explore características de racionalidade de agentes e de diferentes hierarquias de comunicação entre os agentes.

Diante dos diversos objetivos específicos apresentados, faz-se necessário delimitar o assunto tratado. A modelagem da dinâmica do uso da terra é uma tarefa complexa, sendo assim, inviável sem o auxílio computacional. Do mesmo modo, a avaliação e proposição das características do modelo, para ser implementada na ferramenta, deve ser realizada com o apoio de especialistas. A abordagem do modelo escolhido para a problemática a ser exemplificada pelo uso da ferramenta, não é universal nem esgota todas as possibilidades possíveis de interação. Sendo assim, não é possível assegurar que o modelo sintetizado

nesse trabalho revele todos os matizes das situações encontradas pelo estudo da cobertura e do uso da terra no Cerrado.

A solução de SMA é uma abordagem já existente na literatura, com resultados satisfatórios descritos em outros trabalhos e confirmados pelas experimentações executadas. Entretanto, não é a única técnica disponível para analisar essa classe de problemas (Soares-Filho et al., 2002; Veldkamp e Fresco, 1996; Wolfram, 1983). A ferramenta implementou a técnica de SMA buscando uma abordagem inovadora de pesquisa.

O trabalho ora descrito é o início de uma pesquisa que une as áreas de modelagem dos sistemas de uso da terra e da Ciência da Computação, tradicionalmente trabalhadas de maneira isolada. Essa proposta multidisciplinar trabalha a integração dessas ciências de maneira transparente, sempre abordando a visão geral do problema, mas tendo como foco a prototipação da ferramenta computacional, não sendo escopo desse trabalho o aprofundamento em ambas as áreas.

Embora passíveis de serem trabalhos futuros, salienta-se que as características de sistemas distribuídos ou de desempenho computacional não são foco da proposta de solução, merecendo atenção para a melhoria da performance de novas versões da ferramenta proposta.

1.4 Conteúdo e Organização do Documento

A realização desse trabalho desenvolveu-se em fases distintas. Inicialmente, buscou-se resgatar os conceitos de modelagem da cobertura e uso da terra para a fundamentação do problema em pauta. Em seguida, um estudo aprofundado das características e técnicas de SMA foi providenciado. Alguns conceitos de processamento digital de imagens também foram revisados. Após a consolidação da fundamentação teórica, o modelo conceitual foi definido com base na estrutura de parametrização empírica proposta por Smajgl et al. (2011) e o protocolo de descrição de modelos definido por Grimm et al. (2006). A proposta arquitetural da ferramenta e descrição do SMA são feitos pela aplicação da metodologia apresentada por Lin Padgham e Winikoff (2008), com conseguinte implementação e experimentação por meio da realização de estudo de caso no bioma Cerrado.

Assim, o Capítulo 2 desta dissertação busca esclarecer os principais conceitos afetos ao uso e à cobertura da terra, demonstrando a importância da modelagem nessa área de conhecimento, além de evidenciar as técnicas mais usuais e as tendências na pesquisa. Ademais, descreve o bioma Cerrado e detalha a cobertura e uso da terra nesse bioma.

O Capítulo 3, aborda os principais elementos da área de SMA distinguindo suas técnicas, propriedades, metodologias e principais aplicações. Especial atenção é fornecida aos fundamentos que permeiam um SMA, bem como aos padrões e ferramentas utilizados para a análise.

No Capítulo 4 a revisão teórica é concluída com a comparação de ferramentas existentes que possibilitam a investigação de cenários de uso da terra e produção de modelos de simulação. Uma análise das características mais usuais e de lacunas existentes, fundamentou a proposição do trabalho desenvolvido.

O Capítulo 5 apresenta a proposta de solução, com a descrição do modelo utilizado e da ferramenta proposta. O modelo é abordado conforme metodologia padrão e seus conceitos e submodelos são delineados. A arquitetura e o protótipo são detalhados, explicitando

a estrutura conceitual que fundamenta a construção dos agentes e de seus comportamentos. Detalhes da implementação podem ser conferidos, bem como toda a infraestrutura computacional utilizada.

O Capítulo 6 aduz ao estudo de caso realizado, explorando a proposta de solução formalizada no capítulo anterior. Os experimentos desenvolvidos são apresentados.

Com base nas reflexões apresentadas pela fundamentação teórica e seu confronto com a implementação da proposta e seus resultados, o Capítulo 7 conclui o estudo, ao destacar os principais resultados obtidos e as contribuições alcançadas com a pesquisa. A continuidade da solução é discutida e complementada pelas sugestões de trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta uma breve revisão sobre processamento digital de imagens, apresentando seus fundamentos e princípios de melhoria da imagem que foram utilizados no decorrer da pesquisa.

Capítulo 2

Uso e Cobertura da terra

A ecologia de paisagens é o estudo da estrutura, função e dinâmica de áreas heterogêneas compostas pela interação de ecossistemas (Forman e Godron, 1986). Também pode ser entendida como um campo de pesquisa interdisciplinar que lida com as interações entre a sociedade humana e seu espaço de vida, natural e construído, podendo, também, abranger fatores culturais nessas interações (Naveh e Lieberman, 1994).

Em resposta aos impactos das rápidas e abrangentes mudanças no ambiente, tais como a fragmentação de *habitats* e as mudanças no uso e na cobertura da terra, os ecólogos têm expandido a escala e o escopo de suas investigações. A ecologia de paisagens emergiu como um paradigma para a sustentabilidade de ecossistemas e para a gestão ambiental (Turner et al., 1995). Além disso, o interesse nos estudos de paisagens tem sido alimentado por fatores como a ampla disponibilidade de imagens derivadas do sensoriamento remoto, a consolidação e popularização dos sistemas de informação geográfica (SIG) e o maior poder computacional, que permitem análises espaciais mais sofisticadas (Turner et al., 2001).

Essa área de estudo, embora relativamente recente, estabeleceu-se rapidamente como uma ciência adequada para a avaliação de problemas de complexidade ecológica. Complexidade é definida por Bossomaier e Green (2000) como a riqueza e a variedade de comportamentos existentes nos sistemas ambientais. Dada a diversidade de interações ecológicas que existem, não é possível esperar pela formulação de regras universais para o comportamento dos ecossistemas (Green et al., 2006). Entretanto, áreas como a ecologia de paisagens analisam as interações ecológicas como uma rede de conexões que, embora diversa, compartilha estruturas e processos internos. Entender a interação dos processos de retroalimentação e variação temporal e espacial nos ecossistemas tem ajudado a resolver algumas questões-chave que não poderiam ser facilmente abordadas empiricamente.

Identificar como as mudanças no uso e na cobertura da terra afetam vários componentes da paisagem, quais são as forças motrizes naturais e socioeconômicas dessas mudanças e, finalmente, como os organismos podem responder a essas alterações continuam a ser tópicos de pesquisa desafiadores na ecologia de paisagens (Antrop, 2007; Jongman et al., 1995). Nas seções seguintes serão apresentados os conceitos básicos sobre o tema, bem como uma descrição das metodologias mais adotadas e da potencial aplicação de informações resultantes da pesquisa nessa área para o planejamento ambiental. Por fim, o bioma brasileiro possivelmente mais impactado pelas mudanças no uso e na cobertura da terra nos últimos anos, o Cerrado, é caracterizado.

2.1 Conceitos e Nomenclatura

Faz-se necessária a distinção entre os conceitos de uso da terra e cobertura da terra. O termo “cobertura da terra” refere-se aos atributos da superfície terrestre do planeta e o que há imediatamente abaixo dela, incluindo biota, solos, topografia, águas superficiais e subterrâneas e estruturas humanas, dentre outros. Já “uso da terra” refere-se aos fins para os quais humanos exploram a cobertura da terra (Lambin et al., 2000). Uma floresta, por exemplo, é um tipo de cobertura da terra, caracterizada por espécies lenhosas, que pode ser utilizada para usos variados como um sistema agroflorestal ou silvicultura. Além disso, Turner II et al. (1994) distingue conversão da cobertura da terra, isto é, a substituição completa de um tipo de uma cobertura por outra, da mudança na cobertura da terra, ou seja, alterações que afetam o caráter da cobertura da terra, sem no entanto alterar a sua classificação geral.

A definição terminológica merece especial atenção pois afeta diretamente o entendimento do público em geral sobre o tema em pesquisa (Lambin et al., 2000). A área de investigação é conhecida internacionalmente como *land use cover change* (LUCC). No Brasil, a tradução do termo *land* promove interpretações que variam entre “solo” ou “terra”. Na língua inglesa não há dúvida que os termos *land*, *earth* e *soil* possuem significados distintos. Na língua portuguesa, apesar de haver clareza na distinção entre “solo” e “terra”, não há um termo distinto, substituto específico para *land*. Embora sejam encontrados trabalhos na literatura que utilizam “solo” e “terra” indistintamente, optou-se pela adoção do termo “terra”, conceituado e definido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em seu Manual do uso da terra (IBGE, 2006).

Definida a nomenclatura utilizada, cabe ressaltar a importância da área de pesquisa. LUCC é tido como uma das maiores forças motrizes da mudança ambiental do globo. Tais mudanças têm impactos em uma ampla gama de atributos ambientais e da paisagem, incluindo a qualidade da água, recursos da terra e do ar, processos e funções do ecossistema, e o próprio sistema climático, por meio de fluxos de gases de efeito estufa (Lambin et al., 2000). Enquanto a pesquisa, até o final dos anos 90, centrava-se nas conversões da cobertura da terra, hoje concentra-se no entendimento de processos mais sutis que levam à modificação na cobertura ou alteração do uso do terra (Houet et al., 2010).

A magnitude crescente das mudanças no uso e na cobertura da terra tornaram-se uma preocupação mundial na elaboração de políticas, no manejo da terra e nas discussões acerca do desenvolvimento sustentável. O aumento do ritmo de alteração é frequentemente causado por mudanças na gestão das terras agrícolas, pela intensificação da agropecuária e por mudanças nos níveis de insumos e subsídios (McAlpine et al., 2009). A intensificação da utilização da terra para fins agrícolas tem sido uma das formas mais significativas de mudanças na cobertura de terra, com aumentos dramáticos em rendimentos nos últimos 30 anos (Rindfuss et al., 2004).

As mudanças no uso e cobertura da terra são determinadas por interações complexas dos fatores ambientais e socioeconômicos. Um conhecimento abrangente dessas dinâmicas pode ser útil para reconstruir o passado do uso e cobertura da terra e também para prever mudanças futuras. Além disso, é possível apoiar a elaboração de práticas de gestão sustentáveis com o objetivo de preservar as funções essenciais da paisagem (Hietel et al., 2004). Segundo Wu e Hobbs (2002), as causas, processos e consequências das mudanças

no uso e na cobertura da terra, e a integração entre as atividades humanas e ecologia de paisagens são dois tópicos de pesquisa em expansão.

Finalmente, [Lambin et al. \(2000\)](#) afirma que a pesquisa sobre as mudanças no uso da terra se beneficiaria de uma melhor compreensão das complexas relações entre as pessoas e a gestão que elas fazem dos recursos terrestres, e que a intensificação do uso da terra é uma consideração vital nesses processos. O entendimento das interações entre fatores ambientais e socioeconômicos é a base para a modelagem nessa área. De fato, muito da pesquisa nas mudanças no uso e na cobertura da terra foi baseada em modelos. A modelagem, especialmente se for espacialmente explícita, integrada e multi-escalar, é uma técnica importante para a exploração de caminhos alternativos para o futuro, para a condução de experimentos que testem a compreensão existente sobre os processos-chave que regem os sistemas LUC, e para descrevê-los em termos quantitativos. A Seção 2.2 apresenta o detalhamento dessa forma de representação.

2.2 Modelagem e Simulação

Modelagem é o processo de aquisição de conhecimento no qual os princípios de uma ou mais teorias são aplicados para se produzir um modelo de um determinado fenômeno real. Modelo é uma representação abstrata de algum sistema de interesse e é um meio para formalizar, de modo simplificado, o entendimento sobre determinado assunto ou testar, empiricamente, hipóteses ou premissas utilizadas em sua formulação ([Taha, 2006](#)).

Um dos propósitos de um modelo é permitir a previsão do efeito de mudanças no sistema. Ele deve ser uma aproximação do sistema real e incorporar as características mais relevantes, embora não deva ser tão complexo ao ponto de ser impossível compreender os experimentos realizados a partir do modelo. O equilíbrio entre realismo e simplicidade é premissa do pesquisador e reflete a qualidade do modelo ([Maria, 1997](#)).

Para [Metzger et al. \(2007\)](#), modelos em Ecologia de Paisagens podem ser utilizados para formalizar as relações entre padrões espaciais e processos ecológicos, de acordo com premissas pré-estabelecidas, e simular, a partir de um padrão espacial conhecido, as alterações esperadas. Para o autor, a modelagem se revela uma estratégia útil e complementar à experimentação e à observação na geração do conhecimento. Uma vez testados, os modelos permitem criar hipóteses sobre a estrutura ou a dinâmica de um sistema, comparar diferentes cenários de alteração da paisagem, extrapolar os resultados de um caso particular para diferentes escalas espaciais ou temporais, testar a importância relativa de cada parâmetro ou a sensibilidade do modelo a um determinado parâmetro. Por essas características, bons modelos podem ser valiosos instrumentos de decisão, enquanto modelos falsos podem ser perniciosos ([Metzger et al., 2007](#)).

Uma ampla variedade de modelos é utilizada em Ecologia de Paisagens, desde os mais simples, como modelos determinísticos, até os complexos, como os modelos espacialmente explícitos baseados em indivíduos (IBM - *Individual-Based Models*) ([Turner et al., 2001](#)). Por incorporarem parte da heterogeneidade da paisagem, esses modelos são relativamente complexos, espacialmente explícitos e realistas. Encontrar um balanço entre a complexidade desses modelos, que acabam por se tornarem extremamente específicos, e a sua capacidade de generalização, essencial para o avanço de teorias gerais em Ecologia de Paisagens, é um desafio para os pesquisadores ([Metzger et al., 2007](#)).

De modo geral, os modelos podem ser agrupados conforme o uso [Novaes \(1982\)](#):

- Modelo descritivo - visa à compreensão de um determinado sistema;
- Modelo exploratório - modelo descritivo que envolve a análise de parâmetros do sistema, ao perscrutar a relação entre os elementos e o seu relacionamento do sistema em estudo. Geralmente respondem a perguntas “se ... então”;
- Modelo preditivo - modelo exploratório que envolve a variável tempo, compreendendo a projeção de tendências;
- Modelo operacional - também conhecido como modelo de controle, permite a interferência do modelador, por meio da introdução de fatores exógenos nos componentes de sistema e de relacionamentos, de modo a alterar o comportamento do sistema para um propósito específico, como por exemplo os modelos de otimização.

Conforme discussão apresentada no Capítulo 5, o modelo apresentado neste trabalho é basicamente um modelo operacional.

Quanto à sua natureza, os modelos podem ser classificados em três tipos (Neelamkavil, 1987): mental, físico e simbólico. Modelos mentais são heurísticos e intuitivos. O modelo físico é uma descrição do sistema real por meio de uma representação análoga ou pela construção de um protótipo. Já os modelos simbólicos, também denominados modelos conceituais, são uma representação conceitual do sistema e podem apresentar-se sob variadas linguagens, como a matemática, a lógica, a linguística, entre outras. São os modelos simbólicos o foco da discussão do capítulo, uma vez que o modelo implementado no trabalho recebe essa classificação.

Para a área em estudo, os modelos podem ser classificados, quanto à sua solução, em modelos analíticos ou simulações. Para os modelos analíticos, a investigação matemática revela soluções gerais que podem ser aplicadas a amplas classes de comportamentos de modelos. Geralmente são especificados por expressões algébricas e suas relações, de modo a mais se aproximarem da descrição do comportamento do sistema. Quando a complexidade do sistema é grande e quando soluções gerais são impossíveis ou muito difíceis de serem obtidas, ou seja, quando os comportamentos em estudo não são adequados para uma representação matemática, os pesquisadores recorrem aos métodos computacionais para a solução.

Simulação é o uso de um modelo para imitar, em uma escala de tempo, o comportamento de um sistema em estudo (Grant et al., 1997). Modelos de simulação geralmente são compostos de um conjunto de técnicas e operações computacionais que representam a estrutura (estado) e o comportamento (mudança do estado) do sistema de interesse. As simulações computacionais são representadas utilizando-se linguagens de programação, que descrevem como um processo ocorre por meio de uma sequência de passos no tempo. Segundo Taha (2006), os modelos de simulação são geralmente utilizados para analisar dois tipos diferentes de problemas científicos: (i) problemas teóricos relacionados a problemas complexos em áreas como matemática, física, química ou estatística; (ii) problemas relacionados à reprodução detalhada do comportamento de sistemas reais.

Os modelos de simulação podem ser descritos conforme apresentado na Equação 2.1.

$$f(x, p) = y \quad (2.1)$$

onde x é a configuração de entrada x , que define o modelo, p são os parâmetros que caracterizam a simulação e y é a configuração de saída resultante, ilustrada na Figura 2.1

(Menner, 1995). A simulação pode ser alterada pelo ajuste e teste com parâmetros e novos comportamentos podem ser inferidos. Essa situação, relativamente simples de ser efetivada em uma simulação computacional, seria impraticável ou excessivamente cara para ser realizada em um sistema real. Portanto, em um sistema mais amplo, uma simulação é uma ferramenta para avaliar o desempenho de um sistema sob diferentes configurações de interesse e por amplos períodos de tempo (Maria, 1997).

Os modelos de simulação podem ser classificados conforme algumas decisões de projeto Law e Kelton (2000):

- Estáticos ou Dinâmicos - modelos estáticos representam o estado de um sistema em um instante determinado, sendo comum a não utilização da variável tempo nesse modelos. Já os modelos dinâmicos, representam as alterações do sistema em função do tempo.
- Estocásticos ou Determinísticos - modelos estocásticos empregam uma ou várias variáveis aleatórias, enquanto modelos determinísticos são aqueles que não utilizam variáveis aleatórias.
- Discretos ou Contínuos - nos modelos discretos, as variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, geralmente quando da ocorrência de um evento determinado. Nos modelos contínuos, as variáveis mudam de estado continuamente no decorrer do tempo.

Conforme detalhado no Capítulo 5, o modelo de simulação implementado pode ser classificado como dinâmico, determinístico e discreto.

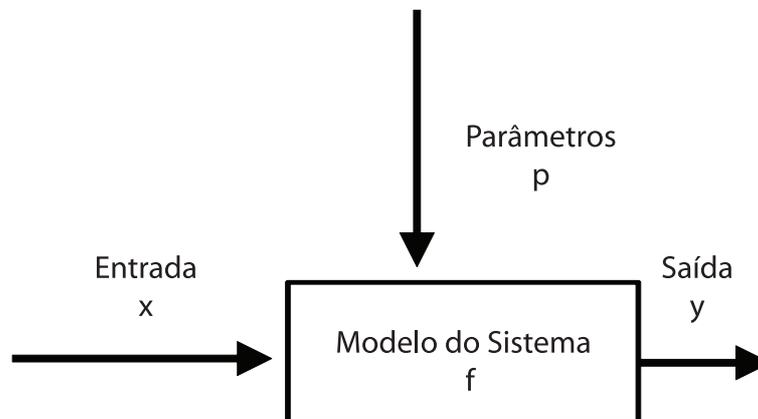


Figura 2.1: Visão Geral de um modelo de simulação (adaptado de Menner (1995)).

As simulações geralmente são iterativas, tendo sua complexidade geral aumentada a cada configuração de parâmetros. Maria (1997) apresenta um esquema do processo de simulação (Figura 2.2), e ressalta a natureza iterativa da simulação quando o sistema alterado (pós-simulação) se torna o sistema em estudo, dando início a um novo ciclo. O autor afirma que em um estudo de simulação as decisões humanas são necessárias em todas as fases, exceto no momento em que a ferramenta de *software* executa a simulação. Todas as demais fases, do desenvolvimento do modelo, de projeto do experimento de simulação e de análise da simulação, podem ser descritas em alguns passos gerais. Para

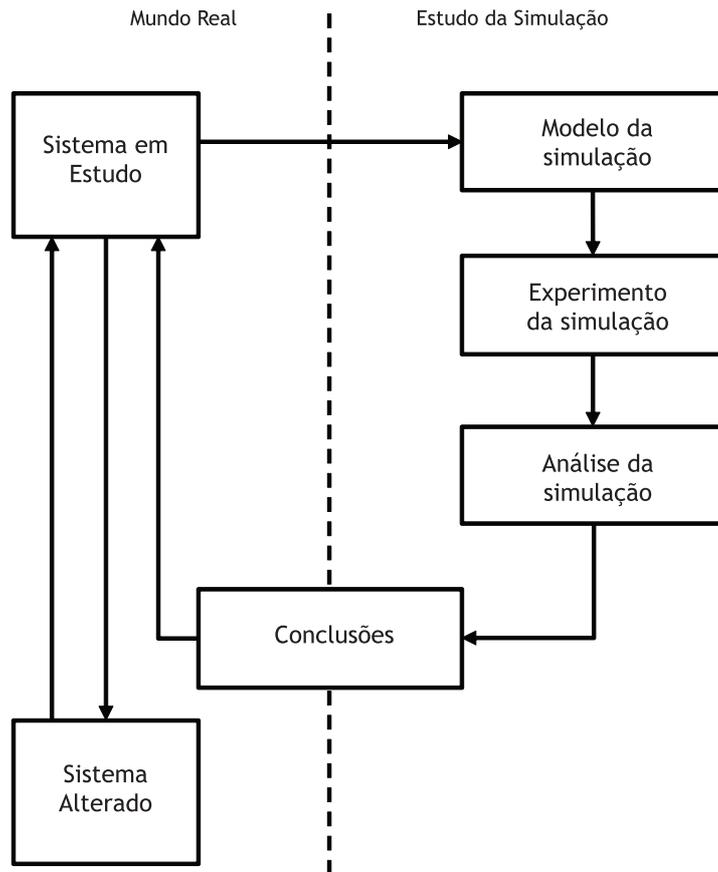


Figura 2.2: Esquema do estudo da simulação (adaptado de [Maria \(1997\)](#)).

cada problema, é necessária a adaptação desses passos à realidade em estudo, com a possibilidade de serem suprimidos alguns passos ou outros serem acrescentados, a saber:

- Passo 1 - Identificar o problema: enumerar os problemas do sistema em estudo. Especificar quais requisitos devem ser investigados;
- Passo 2 - Formular o problema. Selecionar as fronteiras do sistema a ser estudado, os objetivos e quais fatores de interesse a serem avaliados. Definir as medidas de desempenho, de tempo e de espaço. Estimar quais as expectativas do usuário final;
- Passo 3 - Coletar e processar dados do sistema real. Levantar os dados de entrada e outras variáveis e parâmetros;
- Passo 4 - Formular e desenvolver um modelo: formular o modelo conceitual, por meio de esquemas e diagramas sobre como as variáveis se relacionam. Traduzi-los para uma linguagem computacional;
- Passo 5 - Validar o modelo. Comparar o desempenho do modelo sob condições conhecidas. Desenvolver testes estatísticos e submeter o modelo à especialistas;
- Passo 6 - Documentar o modelo para uso futuro. Registrar com detalhes as informações (objetivos, variáveis, parâmetros) que explicitem as decisões tomadas no desenvolvimento do modelo, visando maior organização e referência para posteriores alterações;

- Passo 7 - Estabelecer as condições experimentais para a execução. Selecionar quais serão as medidas de desempenho do modelo, as variáveis de entrada e os pesos de influência de cada variável;
- Passo 8 - Executar a simulação pela ferramenta de *software* determinada para o estudo;
- Passo 9 - Interpretar e apresentar os resultados. Definir quais são as informações obtidas em cada execução. Selecionar as condições de início mais apropriadas;
- Passo 10 - Recomendar cursos de ação. Pode incluir novos experimentos para aumentar a precisão dos parâmetros, e para executar análises de sensibilidade, entre outros.

As simulações computacionais são ferramentas poderosas, entretanto qualquer reprodução do mundo real e de seus processos passa, necessariamente, por simplificações e aproximações. Outros pontos que dificultam a execução de modelos de simulação, principalmente em aplicações relacionadas ao meio ambiente, passam pelos grandes recursos de tempo e custos necessários para a formulação de uma simulação simples. [Green et al. \(2006\)](#) descreve ainda dificuldades mais sutis, devido à inabilidade de grande parte dos ecólogos na escrita de programas de computador, e na transmissão das intenções do modelo em estudo à um programador, de forma clara e objetiva.

[Verburg \(2006\)](#) declara que as simulações são vistas como instrumentos de aquisição do conhecimento e de apoio à decisão. Essas características são especialmente relevantes para a modelagem de problemas relacionados à dinâmica do uso e da cobertura da terra.

2.2.1 Modelagem da Dinâmica do Uso e Cobertura da terra

Modelos são um dos métodos disponíveis no portfólio de ferramentas e técnicas mais difundidas para desvendar a dinâmica dos LUCC ([Verburg, 2006](#)). Segundo [Wu e Hobbs \(2007\)](#), nesse campo de pesquisa é possível distinguir, independente das técnicas adotadas, quatro categorias de modelos:

- Modelos baseados em matrizes de transição - também conhecidos como modelos de probabilidade de transição, dependem de mapas a partir de duas ou mais datas para calcular a evolução histórica das variáveis de interesse, que pode então ser aplicada para o futuro. Necessitam também das transições possíveis entre os estados;
- Modelos que procuram explicar a correlação entre as variáveis de paisagem e as mudanças - As entradas são mapas de cobertura ou uso da terra, bem como mapas do ambiente físico ou espacialização de tipos de explorações. As saídas são correlações que podem ser usadas para simular os efeitos de mudanças nas atividades agrícolas. No caso de paisagens não-antropizadas, as definições de sucessão natural da paisagem constituem as saídas do modelo;
- Modelos usando correlações ou relações causa-efeito entre as estruturas socioeconômicas e uso da terra - As entradas são proporções de uso da terra em várias situações socioeconômicas em diferentes períodos. As saídas são correlações ou modelos funcionais fornecendo proporções de tipos de uso da terra sob várias hipóteses de mudança no contexto socioeconômico;

- Modelos baseados em indivíduos - também chamados de modelos baseados em agentes, focam em regras de comportamento para entidades (indivíduos ou grupos de indivíduos) e mapeiam como decisões humanas afetam a paisagem.

Conforme [Houet et al. \(2010\)](#), a maior diferença entre modelo ecológico e modelo de uso da terra é a dominância dos processos de tomada de decisão humana nos modelos de uso da terra. Por esses fatores, nota-se a tendência da modelagem baseada em indivíduos (ou agentes) para a modelagem LUCC. Essa técnica é notadamente reconhecida por incorporar a influência das decisões humanas no uso da terra de uma maneira formal, mecânica e espacialmente explícita ([Matthews et al., 2007](#)). Vantagens específicas de modelos baseados em agentes são a sua habilidade em modelar decisões individuais, bem como suas interações, além de relacionar dinamicamente processos sociais e ambientais.

Uma característica comum aos modelos de uso e da cobertura da terra é a interação com o espaço. Segundo [Metzger et al. \(2007\)](#), são três as possíveis abordagens:

- Modelos espacialmente implícitos - incorporam parâmetros espaciais, mas sem considerar a posição exata dos componentes do espaço. Não são usuais em aplicações LUCC, sendo mais comuns em outros problemas de modelagem de paisagens;
- Modelos espacialmente explícitos - são os mais comuns nessa classe de problemas de modelagem LUCC. Tais modelos incorporam os parâmetros espaciais, sendo necessário mapear a posição precisa de cada um dos componentes do sistema no espaço. Isso deve-se à dependência de cada um desses componentes ao contexto em que se inserem. O espaço é representado em unidades (células) de tamanho e forma idênticos, com regras de mudança de estado (regras de transição) que dependem da vizinhança;
- Modelos espacialmente realistas - usam a posição exata dos componentes do sistema no espaço, como os modelos espacialmente explícitos, entretanto não simplificam o espaço em unidades idênticas. Tais modelos lidam com objetos de tamanhos e formas diferentes como, por exemplo, manchas e fragmentos, situados em matrizes heterogêneas. Por essas características são considerados como pertencentes à classe de modelos mais complexos.

Devido ao foco da pesquisa em curso, quando citados os modelos de uso e da cobertura da terra, entende-se que são os que aplicam a abordagem espacialmente explícita. Para esta abordagem, a definição de vizinhança é essencial para a caracterização do espaço. [Gardner e Walters \(2002\)](#) apresentam os efeitos de se usar diferentes vizinhanças em modelos de paisagem. Os tipos mais usuais de definição de vizinhança para os modelos espacialmente explícitos, são semelhantes às definições de vizinhança para a conectividade de paisagens, conforme ilustrado na Figura 2.3).

A regra da vizinhança de 4 células (*four-cell neighborhood*), também difundida como a regra do vizinho-mais-próximo (*nearest-neighbor rule*), define como células vizinhas todas aquelas que possuem uma aresta em comum com a célula de referência, nas quatro direções cardinais. A regra da vizinhança de oito células (*eight-cell neighborhood*) considera como vizinhança todas as células que possuem um vértice ou aresta em comum com a célula de referência, nas direções cardinais ou diagonais. Já a vizinhança das doze células (*twelve-cell neighborhood*, ou regra dos três-mais-próximos (*third-nearest-neighbor rule*), estende

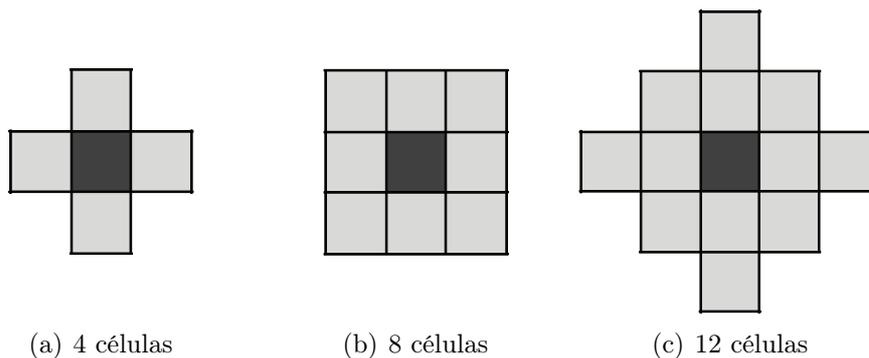


Figura 2.3: Regras de vizinhança a partir da célula de referência. Cada uma das imagens indica a quantidade de células consideradas como vizinhança.

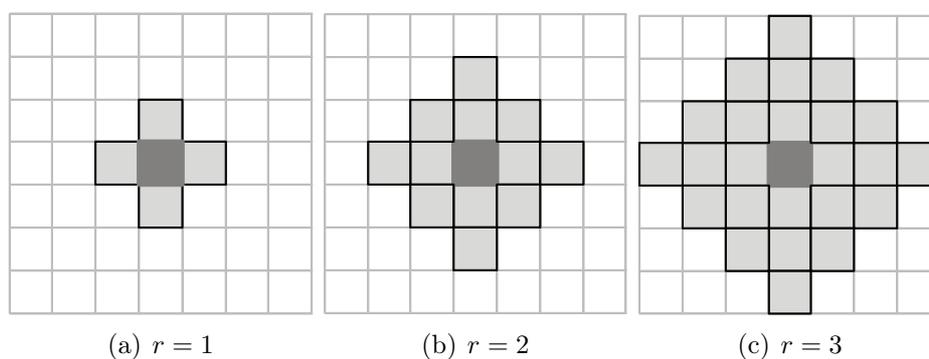


Figura 2.4: Construções de vizinhança radial.

o conceito de vizinhança para células que não se conectam diretamente com a célula de referência.

Também é possível considerar a vizinhança com base em um “raio” a partir da célula de referência. Esse raio pode ser variável e seu valor indica quantas células devem ser consideradas como vizinhança nas quatro direções cardinais. Além disso, também considera como vizinhas todas as células que preenchem a diagonal entre as extremidades desse “raios”. A construção da vizinhança de raios iguais a 1, 2 e 3 é apresentada na Figura 2.4. O número total de células vizinhas é obtido pela função $V(r)$, apresentada na Equação 2.2.

$$V(r) = \frac{(4 + 4r)r}{2} \quad (2.2)$$

onde r é o raio definido para a vizinhança.

Em relação à execução dos modelos, é possível identificar qual é a técnica utilizada em cada aplicação LUC. São três as técnicas mais difundidas para a modelagem da dinâmica do uso da terra: modelos de Markov, autômatos celulares e modelos baseados em indivíduos.

O modelo de Markov é um modelo estocástico que define que um sistema pode ser descrito a partir de um conjunto de estados, um conjunto de ações e um conjunto de efeitos para cada ação. Em relação à primeira ordem do modelo Markov, Usher (1981) assume que para prever o estado do sistema no tempo t_1 , só é necessário saber o estado do sistema no tempo t_0 . Toda a lógica de um modelo de Markov reside na matriz de

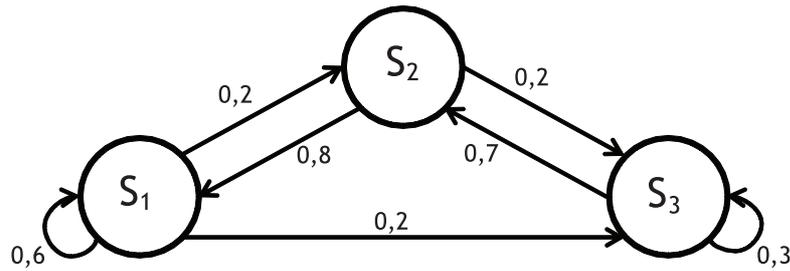


Figura 2.5: Exemplo de cadeia de Markov com 3 estados.

transição P , que resume a probabilidade de que uma célula do tipo de cobertura i possa mudar para a cobertura j , por exemplo. Um modelo de Markov pode ser formalizado como um sistema caracterizado como um conjunto de n estados distintos S_1, S_2, \dots, S_n ; e cujas transições de estado são dadas por um conjunto de probabilidades, como ilustrado na Figura 2.5.

Em intervalo de tempos regulares, o sistema é observado e pode evoluir para outro estado ou permanecer no mesmo, em função do conjunto de probabilidades. A saída desse modelo é o conjunto dos estados em que o sistema se encontrava em cada tempo t (Asmussen e Glynn, 2007). Em algumas aplicações, um modelo simples como esse é suficiente. Em outros casos, essa técnica de modelagem serve como ponto de partida para análises mais complexas (Gardner e Walters, 2002).

Autômatos celulares (CA - *Cellular Automata*) é uma técnica em que o tempo, o espaço e os atributos do sistema físico são discretos. Segundo Wolfram (1983, p.603):

Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme (ou ‘campo matricial’), comumente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (‘célula’). Um autômato celular evolui em passos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontrados no passo de tempo anterior. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente (‘sincronicamente’), baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de regras locais.

A Figura 2.6 ilustra a decisão da célula central, a partir da análise de probabilidade da vizinhança. A característica principal do modelo de CA é o papel da vizinhança. Os modelos baseados em autômatos celulares são amplamente difundidos e utilizados em inúmeras classes de aplicação. Essa técnica tornou-se popular em grande parte pelos CAs serem flexíveis, facilmente tratáveis, capazes de modelar os processos tradicionais de mudança e também por proporcionar complexidade suficiente para a captura de fenômenos emergentes (Soares-Filho et al., 2002). Críticas aos autômatos celulares residem principalmente por considerarem o espaço homogêneo e trabalharem com vizinhanças estacionárias.

Modelos baseados em indivíduos, ou modelos baseados em agentes (ABM - *Agent Based Models*), consistem em uma técnica que modela o sistema como uma coleção de entidades autônomas - capazes de tomarem suas próprias decisões, denominadas agentes - e a relação entre eles. Para o estudo em curso, IBM e ABM são considerados sinônimos pois todos os indivíduos estão associados à sociedade de agentes.

Cada agente individualmente avalia a sua situação e toma as suas decisões com base em um conjunto de regras. Repetidas interações que levam à competição entre agentes

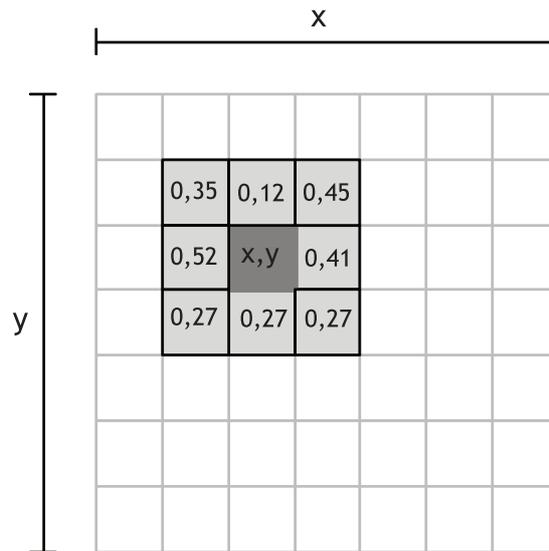


Figura 2.6: Exemplo de campo matricial de autômato celular, com destaque em uma célula e nas probabilidades de sua vizinhança.

são uma característica dessa abordagem, que se apoia nas ferramentas computacionais para explorar dinâmicas que estão fora do alcance dos métodos puramente matemáticos (Bonabeau, 2002). Mesmo um modelo baseado em agentes simples pode exibir padrões de comportamento complexos e fornecer informações valiosas sobre a dinâmica do sistema do mundo real que ele simula, chegando a previsões de comportamentos coletivos. Além disso, os agentes podem ser capazes de evoluir, permitindo que surjam comportamentos imprevistos. Embora os primeiros trabalhos em IBM datem da década de 70, essa técnica de modelagem passou a ser amplamente difundida no final dos anos 90, principalmente pela capacidade que IBMs têm de captar fenômenos emergentes, de fornecer descrições naturais para um sistema e de serem essencialmente flexíveis (Bousquet e Le Page, 2004; Matthews et al., 2007).

A aplicação dessa técnica é mais natural para a descrição e simulação de sistemas compostos de entidades que possuem comportamentos claros e distintos, não sendo recomendada a todas as classes de problemas (Huston et al., 1988). Algumas desvantagens de IBMs são amplamente conhecidas, como por exemplo, sua intrínseca necessidade de especificidade. Embora a técnica possa ser empregada em variadas aplicações, modelos de propósito geral contradizem a proposta dos IBMs, uma vez que a construção desses modelos requer um nível certo de descrição, com a quantidade adequada de detalhes para servir o seu propósito. Outra desvantagem é a subjetividade inerente à técnica. Como na maioria das vezes os problemas indicados para a aplicação de IBMs envolvem agentes humanos, com comportamento potencialmente irracional, escolhas subjetivas, entre outras, é difícil quantificar, calibrar, e muitas vezes de justificar decisões e parametrizações de IBMs. Entretanto, ainda que exista uma incerteza associada, pode-se afirmar que apesar de constituir uma importante fonte de problemas na interpretação dos resultados de simulações, é justo dizer que na maioria dos casos, IBM são quase sempre a única técnica a lidar com tais situações (Bonabeau, 2002).

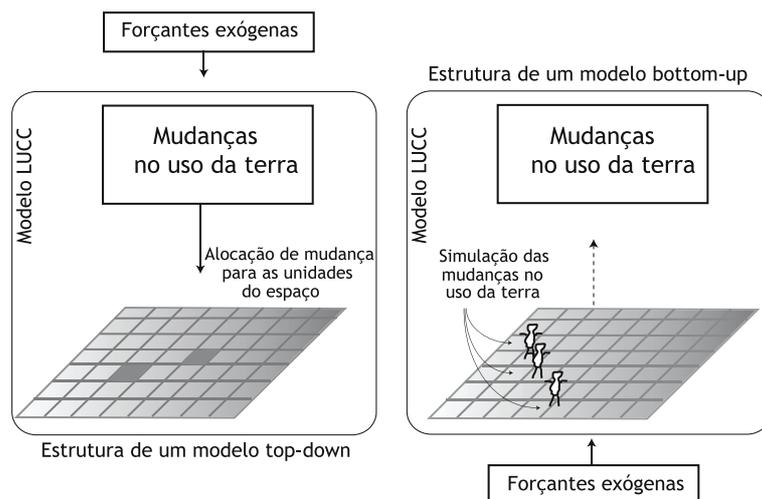


Figura 2.7: Estrutura *top-down* e *bottom-up* para modelos LUC (adaptado de Verburg (2006)).

Independente da técnica utilizada em seu desenvolvimento, a mudança no uso da terra é tida como resultado de um processo multi-escalar em que forças-motrizas e variáveis operam em diferentes escalas e influenciam as taxas e a localização da mudança (Wu e Hobbs, 2007). No entanto, os métodos de pesquisa não são frequentemente concebidos para a análise nessas múltiplas escalas (Verburg, 2006). Esta limitação se reflete na estrutura dos modelos, sendo comum a utilização de duas abordagens para a modelagem do uso e da cobertura da terra: modelos *bottom-up* e *top-down*. Essas duas classes de modelos diferem em relação à ênfase depositada na compreensão global das mudanças *versus* o entendimento das decisões e ajustes locais (Böhringer e Rutherford, 2008). Uma visão geral das duas abordagens é ilustrada na Figura 2.7.

A abordagem *bottom-up* fornece um modelo explicativo das mudanças no uso da terra baseado na observação das interações entre os agentes, por exemplo, agricultores. Os modelos *bottom-up* geralmente iniciam sua atuação no nível dos agentes ou das unidades de espaço. Nesse nível, as decisões são simuladas a partir da influência das condições locais. A mudança global do sistema é o resultado de todas as decisões locais (Verburg, 2006). Uma pesquisa com os atores envolvidos no modelo deve elicitar as regras de decisão individuais e a formulação das mudanças no uso e na cobertura da terra conduzidas pelo homem (Castella et al., 2007). Tais modelos geralmente negligenciam os impactos macroeconômicos e de políticas setoriais. O modelo baseado em indivíduo é a técnica que melhor exemplifica essa abordagem.

Modelos *top-down* adotam uma perspectiva panorâmica de análise, levando em consideração fatores econômicos, políticos e forças motrizas em busca de correlações que expliquem o surgimento dos padrões LUC (Castella et al., 2007). Geralmente são usados quando uma taxa agregada de mudança pode ser determinada para a região de estudo como um todo, que depois é alocada espacialmente conforme técnicas específicas (Verburg, 2006). Modelos *top-down* convencionais têm uma representação limitada dos agentes que alteram o uso e a cobertura da terra e, conseqüentemente, carecem de detalhes acerca das decisões que podem afetar o sistema. Modelos que utilizam as técnicas de Markov e autômato celular tradicionalmente são modelos *top-down*.

A adequação das abordagens *top-down* ou *bottom-up* deve ser relativa ao problema em estudo, pois existem mudanças do uso da terra que são diretamente determinadas por processos locais, como a regeneração da vegetação natural, bem como existem análises de expansão da agricultura que serão melhor modeladas a um nível *top-down*. No entanto, [Verburg \(2006\)](#) afirma que uma hierarquia puramente *bottom-up* ou *top-down* é insuficiente na maioria dos casos.

Os pontos fortes e fraquezas específicas de cada uma dessas abordagens explicam a ampla gama de esforços de modelagem híbridos, ou seja, que visam combinar as duas hierarquias. A abordagem híbrida deve fornecer o equilíbrio entre os efeitos retratados pela visão *bottom-up*, resultados das condições locais, e da visão *top-down*, como resultado de uma taxa de mudança que age sobre o espaço como um todo ([Verburg, 1999](#)). [Barnaud et al. \(2008\)](#) e [Verburg et al. \(2009\)](#) apontam o equilíbrio entre as duas abordagens como uma dos principais desafios de pesquisa para o estudo das mudanças no uso e na cobertura da terra, pois afirmam que só é possível representar a dinâmica desses sistemas de maneira realista quando são consideradas as influências regionais e os intervenientes políticos, ambos agindo em conjunto com as mudanças em escala local.

Apesar dessa perspectiva, os processos de formulação de políticas e implementação tendem a basear-se unicamente na abordagem *top-down*. A abordagem *top-down* para a gestão de recursos limita o conhecimento dos decisores políticos sobre o sistema, podendo levar a políticas mal formuladas que afetam drasticamente o ambiente, devido à exploração insustentável. Também pode negligenciar como os atores reais agem sobre a paisagem, resultando, por exemplo, na redução de oportunidades de subsídios ou financiamento ([Campo, 2005](#)). Uma gestão integrada dos recursos naturais, ou uma abordagem realista de cenários LUCC, muito podem se beneficiar da conciliação das abordagens *top-down* e *bottom-up* para a modelagem LUCC ([Castella et al., 2007](#)).

Conforme o apresentado, é possível notar a variabilidade das possibilidades de modelagem e simulação, referentes aos métodos, à interação com o espaço, às técnicas e aos propósitos em estudo. Não diferentes são as aplicações desse arcabouço teórico na investigação da dinâmica do uso e da cobertura da terra.

2.2.2 Tendências na Pesquisa LUCC

São diversas as aplicações dos modelos e simulações na temática ambiental. Os exemplos variam desde a aplicação de simulações para o manejo de bacias, dispersão de fogo pelo Cerrado, áreas para conservação, gerenciamento de recursos renováveis, trocas econômicas relacionadas aos serviços ambientais, até modelos de sequestro de carbono e mudanças do clima. A mesma diversidade pode ser encontrada quando o escopo é reduzido apenas às aplicações para o entendimento da dinâmica de uso da terra. Entretanto, algumas tendências da pesquisa nessa área podem ser destacadas. Nesta seção, apontam-se alguns trabalhos recentes e relevantes à discussão, bem como identificam-se os temas que têm demandado maior atenção dos pesquisadores.

[Naivinit et al. \(2010\)](#) é um dos trabalhos que apresenta o conceito de modelagem e simulação baseada em agentes participativa. Essa abordagem foi projetada como um método iterativo, contínuo e integrador de todos os envolvidos em um estudo de caso específico, com o objetivo de facilitar o diálogo, compartilhar o conhecimento e proporcionar a tomada de decisão coletiva por meio de ações e pesquisas interdisciplinares. Visa

também fortalecer a capacidade de gestão adaptativa dos tomadores de decisão para enfrentar problemas comuns de gerenciamento de recursos naturais. O estudo de caso do autor utiliza a técnica de RPG (*role-playing game*) para a modelagem e simulação da produção de arroz e das migrações da mão de obra do trabalho no nordeste da Tailândia. Pode-se destacar a importância de um processo de modelagem colaborativo. Com a participação dos grupos de interesse no processo de modelagem, é possível confrontar as visões de cada um dos interessados com as próprias visões dos pesquisadores para que os cenários sejam construídos de forma clara, mas que ao mesmo tempo sejam capazes de explorar os riscos e as incertezas relacionadas ao problema.

São várias as pesquisas voltadas para os decisores políticos e planejadores, e para o apoio aos processos de tomada de decisão, em detrimento ao modelo clássico de pesquisa e teste de hipóteses. Principalmente no que diz respeito aos processos de uso e cobertura da terra, o público-alvo tende a ser a classe gestora, capaz de influenciar as decisões que afetam a região. Os trabalhos de Almeida et al. (2010) investigam questões essenciais da dinâmica dos processos ecológicos, tendo como principal usuário os tomadores de decisão. É possível notar que esses mesmos trabalhos adotam a computação, e conseqüentemente a simulação computacional, como principal ferramenta nessa área.

Sterk et al. (2011) discute os mecanismos que podem reger o desenvolvimento e aplicação de modelos de uso da terra, de modo a aumentar, a partir dos trabalhos de modelagem, as chances de benefício social. O autor afirma que quase todos os trabalhos científicos da área argumentam que a gestão da terra e dos recursos naturais poderia potencialmente se beneficiar desses objetos de pesquisa. Entretanto, pouco se tem de concreto na análise de que vantagens podem advir das ferramentas de modelagem. O trabalho apresenta um *framework* para capturar essas informações e é possível destacar da proposta o crescente interesse na modelagem participativa e a mudança de paradigma de modelos como “ferramentas de apoio à decisão” para “ferramentas de aprendizagem”. A difusão dessa nova visão reflete uma mudança na conceituação de como as decisões acontecem e sugere que os impactos dos modelos de uso da terra não se limitam ao sistema físico, mas se estendem sobre as normas e valores dos atores, podem mediar conflitos entre as partes interessadas e contribuir como ferramenta de construção coletiva.

A preocupação com a qualidade dos modelos e ferramentas também é recorrente, e geralmente organiza-se nas frentes: estrutura, evidência e metodologia (McIntosh et al., 2011). Para que um *software* exerça um impacto positivo sobre a política e a gestão de recursos, essas ferramentas precisam ser cientificamente e tecnicamente sólidas, eficazes, confiáveis, utilizáveis e acessíveis. Além disso, o conhecimento do público-alvo, de suas necessidades e intenções é essencial. O conhecimento desse conjunto fornecerá aconselhamento estratégico para os pesquisadores, financiadores, usuários eventuais, no que concerne ao desenvolvimento, aquisição e uso da tecnologia de modelagem. Toda a pesquisa deve ser escrutinada criteriosamente, de maneira objetiva, avaliando quantitativamente o modelo e todos os atributos do *software*. Para as modelagens em agentes, assumidamente mais subjetivas, essas necessidades são ainda mais prementes. Em relação às melhorias relacionadas à estrutura, Smajgl et al. (2011) descreve um *framework* para caracterizar empiricamente o comportamento dos agentes em sistemas socio-ecológicos, ao buscar uma sistematização para a caracterização e parametrização dos comportamentos humanos.

Associados às evidências, apesar das muitas abordagens de modelagem diferentes que

vêm sido adotadas, poucos estudos de modelagem explicitamente procuraram avaliar a possível intensificação nas mudanças no uso da terra decorrentes de mudanças na gestão. Embora os economistas já tenham longa tradição no estudo da intensificação agrícola em relação às práticas de gestão e condições (por exemplo, os preços dos insumos, as funções de produção), poucos estudos revelam quais fatores impactam essas mudanças, além dos incentivos econômicos. Um grupo de pesquisadores vem trabalhando essas questões na última década, sendo [Lambin et al. \(2000\)](#) o marco inicial dessas discussões.

Em relação às metodologias, [Verburg et al. \(2011\)](#) investigam os desafios na utilização da modelagem LUCC para estudos de mudanças globais. É sabido que o uso e a cobertura a terra desempenham um papel central na avaliação das alterações climáticas. Entretanto, cada fonte de uso da terra tem seu próprio domínio de aplicabilidade e restrições. Os autores destacam os problemas provenientes da adequação dos dados para outras escalas e níveis de agregação, além de discutirem sobre os efeitos dessas incertezas nos dados sobre os resultados. O trabalho então propõe métodos para a integração de dados, técnicas de melhoria da validação e harmonização dos sistemas de classificação, de modo a atender à demanda de estudos na escala global e manter a qualidade dos modelos.

Um avanço perceptível nos estudos da área é a padronização entre as descrições dos modelos. Devido à grande variedade de aplicações e metodologias passíveis de serem utilizadas, a descrição de cada modelo ocorria conforme a percepção da equipe de pesquisadores, dificultando a replicação de resultados e a comparação entre diferentes propostas. A partir dessa necessidade, a última década produziu várias métodos para a padronização dessas descrições, tendo o protocolo ODD (*Overview, Design concepts and Details*) sido consagrado como a referência mais utilizada.

2.2.3 Protocolo Padrão ODD

O protocolo ODD foi proposto por [Grimm et al. \(2006\)](#) em 2006 e já passou por aperfeiçoamentos desde então ([Grimm et al., 2010](#)). A sigla ODD sintetiza os três grandes blocos desse protocolo padrão para a descrição de IBM ou ABM: *Overview, Design Concepts* e *Details*. Sem essa padronização, os modelos que aplicam essa técnica são difíceis de entender e replicar. Isso acontece, principalmente, porque os modelos baseados em indivíduos são mais difíceis de comunicar do que os modelos tradicionais analíticos, que são formulados, em geral, em linguagem matemática. O protocolo ODD propõe uma estrutura para a comunicação de IBMs, com o objetivo de torná-los menos ambíguos, mais completos e acessíveis. A idéia básica é estruturar a informação dos modelos sempre na mesma sequência explicitada na Figura 2.8, que consiste de sete elementos que podem ser agrupados nos três grandes grupos já citados.

O primeiro grande bloco da metodologia, a Visão Geral (*Overview*) é composta de três elementos que fornecem uma visão do propósito geral e da estrutura do modelo. Com essa descrição é possível captar contexto, o foco do modelo, sua resolução e complexidade.

O bloco que descreve os conceitos de Projeto (*Design concepts*) não descreve o modelo em si, mas os conceitos que regem o projeto do modelo. São considerações estratégicas, que têm por objetivo esclarecer quais são as diretrizes definidas pelos pesquisadores em termos das interações possíveis entre os indivíduos,

Finalmente, em Detalhes (*Details*) são apresentados todos os pormenores que foram omitidos na visão geral e nos conceitos de projeto. Os submodelos que implementam

Overview Visão Geral	Propósito Entidades, variáveis de estado, e escalas Visão geral do processo e programação
Design Concepts Conceitos de Projeto	Conceitos de Projeto
Details Detalhes	Inicialização Dados de entrada Submodelos

Figura 2.8: Os três blocos do protocolo ODD e seus elementos (adaptado de Grimm et al. (2006)).

os processos do modelo são descritos detalhadamente. Nesse bloco, o pesquisador deve fornecer todas as informações requeridas para a reimplementação do modelo ou para a simulação de cenários básicos.

Com esse conjunto de informações, qualquer leitor, mesmo não familiarizado com a técnica, poderia apontar as funcionalidades e propósitos de um modelo apresentado. Os principais requisitos que devem ser elicitados em cada um dos elementos, são:

- Propósito - apresenta uma clara, concisa e específica formulação dos objetivos do modelo. Informa qual a necessidade da construção do modelo complexo e o que será feito dele;
- Entidades, variáveis de estado e escalas - uma entidade é um objeto ou ator distinto que se comporta como uma unidade que pode interagir com outras entidades e afetar ou ser afetado por fatores externos. Uma variável de estado é um atributo que distingue uma entidade da outra. Esse elemento informa qual é a estrutura do sistema do modelo. Por exemplo, quais entidades são descritas, como elas são descritas, se existem relações de hierarquia, além de explicitar quais são as resoluções espaciais e temporais e quais são os elementos bióticos e abióticos descritos no modelo. As escalas devem ser definidas e as dimensões do modelo explicitadas;
- Visão geral do processo e programação - elicitam quais são os processos individuais e ambientais embarcados no modelo e quais são os seus efeitos. A programação dos processos também deve ser descrita, ou seja, a ordem em que os processos são executados, quando as variáveis são atualizadas, quem executa cada processo, como o tempo é modelado no IBM, se existem eventos dinâmicos no modelo e que ações são executadas de maneira atômica, dentre outras características relevantes;
- Conceitos de Projeto - os autores fornecem uma lista de elementos, que podem ser utilizados pelo desenvolvedor do modelo para explicitar as características subjacentes à implementação. Nem todos os conceitos listados pelos autores são aplicáveis a qualquer modelo. São eles: *Princípios Básicos* - quais os conceitos gerais, hipóte-

ses ou teorias subjacentes ao modelo; *Emergência* - quais características surgem da interação dos indivíduos, e quais fenômenos são impostos; *Adaptação* - quais traços adaptativos o modelo possui para influenciar a função utilidade de cada indivíduo; *Aptidão* - quais são os objetivos de cada agente; *Objetivos* - quais são os objetivos que influenciam as decisões de cada agente; *Aprendizagem* - se as diferentes sequências de experiências modificam o padrão de ação do agente; *Predição* - como as entidades estimam ou predizem as consequências futuras das suas decisões; *Percepção* - quais variáveis são percebidas ou já sabidas e consideradas pelo agente na tomada de suas decisões; *Interação* - quais interações entre os indivíduos são esperadas; *Estocasticidade* - se ela existe no modelo e porque; *Coletivos* - se as entidades são agrupadas em algum tipo de agrupamento social; *Observação* - Como os dados são coletados do IBM para teste, entendimento e análise;

- Inicialização - trata de questões tais como quando e quem são os indivíduos criados no início de cada simulação, se as variáveis de inicialização são aleatórias ou baseadas em dados e se a inicialização é sempre a mesma ou se existe variedade entre as simulações;
- Dados de entrada - quais são os dados de entrada que serão avaliados no modelo, como eles foram gerados e como podem ser obtidos;
- Submodelos - todos os processos explicitados no elemento ‘Visão geral do processo’ representam os submodelos que necessitam ser detalhados e seus parâmetros descritos. Os submodelos podem ser descritos em linguagem matemática, quando possível, ou têm suas regras e parâmetros exemplificados.

Todo o processo de modelagem é influenciado pela escolha da área de estudo. Algumas características da área de estudo selecionada para ser o alvo da pesquisa, o bioma Cerrado, são apresentadas na Seção 2.3.

2.3 O Bioma Cerrado

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, sendo superado em área apenas pela Amazônia. Ocupa $\frac{1}{4}$ do território nacional e é classificado por [Borlaug \(2002\)](#) como uma das últimas fronteiras agrícola do planeta. Historicamente, suas terras eram inexploradas principalmente devido aos seus solos ácidos. Entretanto, a determinação de centros de pesquisa em tornar essas terras aráveis ocasionou as mudanças de uso da terra mais significativas das últimas décadas, tornando realidade a transformação do Cerrado em terras para a produção agrícola.

Qualquer discussão sobre o Cerrado hoje perpassa o entendimento da dinâmica LUCC, devido às profundas mudanças ocasionadas pela vertiginosa tendência de utilização do Cerrado para fins do agronegócio. Entretanto, para utilizar, bem como para preservar o bioma Cerrado, é necessário conhecer a sua diversidade ([Sano et al., 2008](#)). A Seção 2.3.1 caracteriza brevemente o bioma, seguida por uma descrição do uso e cobertura da terra no Cerrado.



Figura 2.9: Mapa dos Biomas Brasileiros (IBGE).

2.3.1 Caracterização do Cerrado

O Cerrado ocupa, aproximadamente, 204 milhões de hectares na porção central do Brasil (Sano et al., 2010). Por sua localização, o Cerrado faz contato com os biomas Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal, só não tendo interface com o bioma Pampa, conforme ilustrado na Figura 2.9. O bioma está distribuído pelo território de 12 unidades federativas (UFs), sendo elas: Bahia, Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, Rondônia, São Paulo e Tocantins.

O termo Cerrado designa um conjunto de ecossistemas formados por matas, campos, matas de galeria e savanas. Ribeiro e Walter (1998) destacam as variadas fitofisionomias vegetais do bioma, subdividindo-as em 11 tipos, agrupados em 3 grupos: fitofisionomias campestres (campo sujo, campo limpo e campo rupestre), florestais (mata ciliar, mata de galeria, mata seca, e cerradão) e savânicas (cerrado *strictu sensu*, parque de cerrado, palmeiral e vereda).

O clima da região possui destacada sazonalidade climática, com a alternância de estação chuvosa e estação seca. As temperaturas são amenas ao longo do ano, variando entre 22°C e 27°C, com precipitação média anual de 1.500mm (Klink e Machado, 2005). Os solos são predominantemente latossolos (50%), caracterizados por sua alta acidez, elevadas concentrações de alumínio e carência de nutrientes, como o fósforo.

O Cerrado é uma das mais ricas savanas do mundo, sendo o segundo bioma brasileiro mais rico em biodiversidade, apesar dessa constatação contrariar o senso comum. O bioma é considerado um *hotspot*¹ da biodiversidade mundial, requerendo ações urgentes para a conservação da riqueza biológica frente às ameaças de destruição.

A biodiversidade elevada expressa-se em números: 12.356 espécies de plantas vasculares (Mendonça, 2008), 191 de mamíferos (Marinho-Filho et al., 2002), 837 de aves (Silva, 1995b), 184 de répteis e 113 de anfíbios (Colli et al., 2002). Desse variado grupo, há um significativo número de endemismos, principalmente de plantas. O Cerrado apresenta também um significativo número de endemismos para vários grupos de animais e, principalmente, plantas. Estima-se que 44% das plantas do Cerrado sejam endêmicas (Myers et al., 2000), número que pode ser superior a 70% em alguns grupos (Filgueiras, 2002). Esses números tendem a se tornar mais expressivos com o aumento do conhecimento da biodiversidade do Cerrado. Apesar do número elevado de espécies já registradas para o bioma, a biodiversidade do Cerrado ainda permanece, em sua maioria, pouco conhecida (Roma, 2006).

Além de sua importância pela expressiva riqueza em biodiversidade, no Cerrado localizam-se as nascentes que alimentam as grandes bacias hidrográficas brasileiras, sendo sua conservação prioritária para a manutenção do regime hídrico. É relevante destacar, também, o valor das reservas de água doce presentes no subsolo, como o aquífero Guarani.

Pela relevância ambiental do Cerrado, era de se esperar esforços consistentes de sua conservação. Entretanto, historicamente são altíssimas as taxas de desmatamento nesse bioma, muito superiores, inclusive, às taxas de desmatamento na Floresta Amazônica. Os dados do Ibama mostram uma perda acumulada de 47,8% de cobertura vegetal natural do Cerrado até 2008 (Ibama, 2009). Especialistas apontam que existe um esforço de conservação muito inferior às reais necessidades do bioma. Somente 2,2% do território ocupado pelo Cerrado é legalmente protegido. A intensidade e rapidez do processo de devastação do Cerrado fizeram com que Klink e Machado (2005) apontassem como principal desafio a conciliação entre o uso da terra e a conservação desse bioma.

2.3.2 Cobertura e Uso da terra no Cerrado

Um estudo de como se deu a ocupação do Cerrado, apresenta elementos para a compreensão do mosaico de uso e ocupação desse Bioma hoje. Klink e Moreira (2002) relatam que a ocupação do Cerrado iniciou-se na década de 1920, com o plantio de café em São Paulo. Um outro fator que proporcionou o avanço da ocupação se deu pela decisão política do então presidente Getúlio Vargas, ao fornecer subsídios e financiamentos a pecuaristas que ocupassem o sul de Goiás, em uma medida visando abrir novas fronteiras frente o esgotamento das terras férteis do Sul e Sudeste do Brasil, e com o crescimento populacional

¹Conceito apresentado por (Myers et al., 2000) para designar regiões que concentram altos níveis de biodiversidade e onde as ações de conservação precisam ser mais urgentes. A classificação considera o número de espécies endêmicas por área e o grau de perda do hábitat.

Tabela 2.1: Dados sobre a cobertura da terra do Cerrado - ano de referência 2008 (Ibama, 2009).

Classificação da cobertura da terra	Área em km^2	% do bioma
Antrópico anterior a 2002	850.636,68	43,67
Antrópico entre 2002 e 2008	85.074,87	4,17
Antrópico total (2008)	975.711,55	47,84
Corpo d'água (2002)	12.228,71	0,60
Corpo d'água (2008)	12.492,93	0,61
Vegetação Remanescente até 2002	1.136.521,51	55,73
Vegetação Remanescente até 2008	1.051.182,42	51,54

brasileiro. Nos últimos 50 anos, a paisagem do Cerrado foi alterada intensamente pela consolidação do processo de expansão agropecuária intensiva, com a mecanização e inovação tecnológicas na agricultura, pelo significativo investimento de capital e energia e recursos de pesquisa aplicados nesse mister.

O Projeto de Monitoramento do Desmatamento nos Biomas Brasileiros por Satélite, realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e pelo Ibama, consiste na realização do monitoramento sistemático da cobertura vegetal dos biomas brasileiros para embasar ações e políticas de prevenção e controle de desmatamentos ilegais nesses biomas, além de subsidiar políticas públicas de conservação da biodiversidade e de mitigação da mudança do clima². O monitoramento da cobertura vegetal do bioma Cerrado tem por base os Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros, produzidos pelo MMA/PROBIO em 2007 (ano base 2002) e mapeou a cobertura vegetal natural e antrópica do bioma na escala de 1:250.000. As imagens analisadas foram obtidas do satélite Landsat ETM+ (ver Seção 2.4) e classificadas pelo Centro de Sensoriamento Remoto do Ibama.

O estudo tem como referência a área total do Cerrado igual a 2.039.386 km^2 , compreendendo a seguinte classificação: cobertura vegetal natural, a cobertura antrópica e corpo d'água. Os dados oficiais mais atuais datam de 2008, período em que os remanescentes de vegetação somavam aproximadamente 1.051.182 km^2 , isto é, 51,54% da área total do bioma, enquanto que as áreas desmatadas equivaliam a 975.711 mil km^2 , 47,84% da área total. A Figura 2.10 apresenta a distribuição espacial da cobertura da terra do Cerrado em 2008. A Tabela 2.1 compara as áreas de vegetação remanescente e de uso antrópico entre os anos de 2002 e 2008, mostrando que a taxa de desmatamento do Cerrado nesse período foi de 4,17% da área do bioma, o que equivale a uma área de 85.075 km^2 .

Percebe-se que a porção sul do bioma concentra as maiores áreas de uso da terra, enquanto a maior parte da vegetação natural localiza-se ao norte. A porção norte desse bioma permanece relativamente preservada pela distância de grandes centros urbanos e principalmente pelas dificuldades de acesso (Sano et al., 2008).

²Monitoramento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>. Acesso em 07/01/2011.

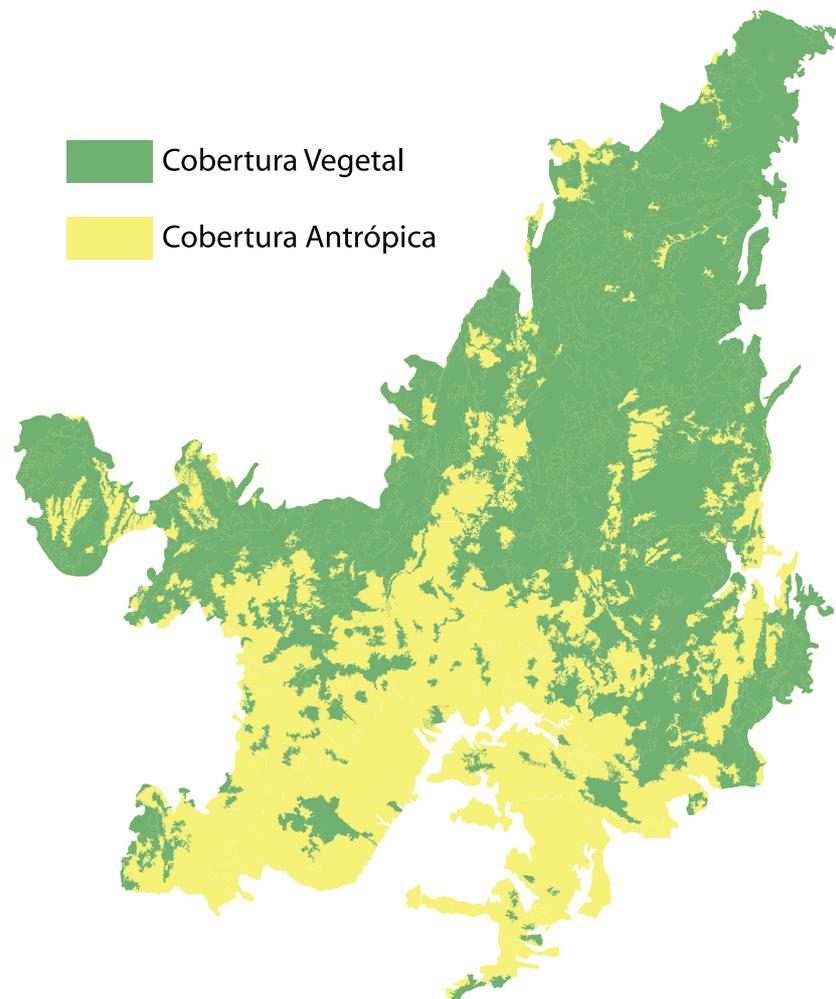


Figura 2.10: Distribuição espacial de áreas com cobertura vegetal natural e antrópica no bioma Cerrado em 2002.

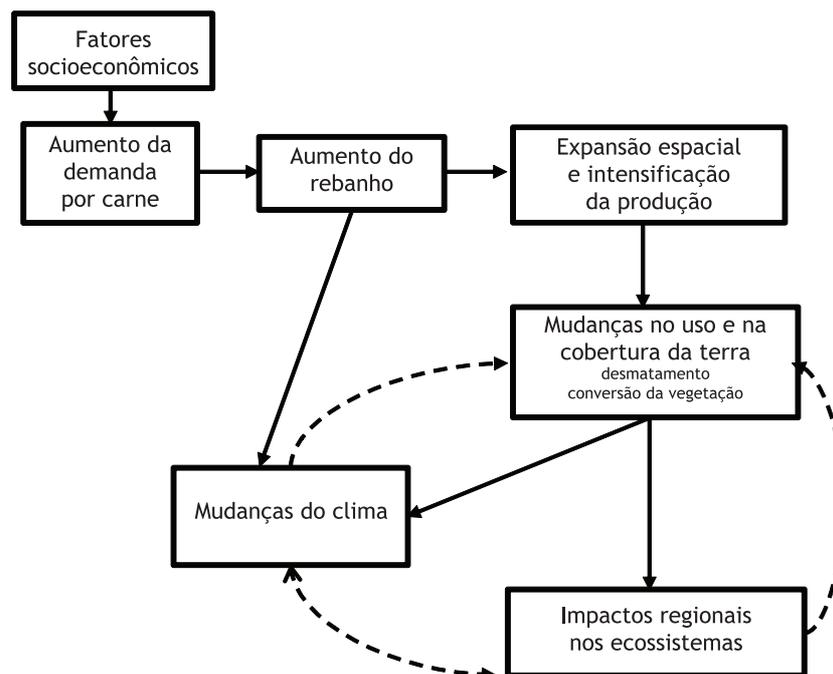


Figura 2.11: Modelo conceitual das pressões socioeconômicas por carne e os impactos resultantes no ambiente regional e global (adaptado de [McAlpine et al. \(2009\)](#)).

É consenso na literatura que o avanço das atividades agropecuárias é o principal fator responsável pela substituição da vegetação natural do Cerrado. Para [Klink e Moreira \(2002\)](#), [McAlpine et al. \(2009\)](#) e [Smith et al. \(1998\)](#), as pastagens plantadas são, de longe, o uso da terra mais importante do Cerrado, representando 67% do total de terras desmatadas. A pecuária varia de fazendas modernas e eficientes até instalações rudimentares com baixa produtividade. [Klink e Machado \(2005\)](#) destacam o fato de que, para a formação de pastagens, o Cerrado é inicialmente limpo e queimado, seguindo da sementeira de espécies exóticas de gramíneas africanas, sendo uma das variedades mais utilizadas o capim-gordura, extremamente prejudiciais à biodiversidade e altamente inflamável nos períodos de seca. [McAlpine et al. \(2009\)](#) afirmam que o fato do Brasil ser o maior exportador de carne bovina do mundo, é reflexo de uma postura política, motivada por fatores socioeconômicos, que alimenta o ciclo de devastação dos biomas naturais, como ilustrado na Figura 2.11.

O mesmo padrão é encontrado para a agricultura, sucessora natural dos pastos, com destaque para monocultura. Nas últimas décadas, o bioma Cerrado tem se tornado a maior fonte brasileira de soja e pastos, e um significativo produtor de milho, arroz e algodão. Em contraste com as pequenas fazendas em outras partes do Brasil, [Klink e Moreira \(2002\)](#) descrevem um tipo diferente de agricultura, com intensivo aporte financeiro, de larga-escala, mecanizada e com apoio científico, que tem se desenvolvido nos solos pobres, porém baratos, do Cerrado. Embora esse novo tipo de agricultura não esteja igualmente distribuído por toda a extensão do Cerrado, encontra-se bem estabelecida no estado do Mato Grosso do Sul, no sul de Mato Grosso, sudeste, sudoeste e centro de Goiás, no Distrito Federal e no triângulo mineiro e oeste de Minas Gerais.

Um mapeamento semidetalhado ([Sano et al., 2008](#)) descreveu o uso da terra do bioma

Tabela 2.2: Área (em hectares) ocupada pelas diferentes classes de uso da terra nos estados cobertos pelo Bioma Cerrado (ano-base: 2002; área total do Cerrado: 204,7 milhões de hectares (Sano et al., 2008)).

Estado	Cerrado %	Cultura agrícola	Pastagem cultivada	Reflorestamento	Área Urbana	Área com Mineração	Total	Uso da terra%
PI	37	215.265	521.731	1.379	20.933	0	759.307	8
MA	65	356.028	1.901.655	27.171	35.876	0	2.320.731	11
TO	91	175.565	4.253.134	376.645	36.350	2.406	4.844.100	19
BA	27	1.572.701	2.257.253	125.869	11.892	0	3.967.715	26
MT	40	5.561.053	6.508.944	31.974	64.268	3.289	12.169.529	34
MG	57	2.122.452	11.838.147	1.302.344	171.832	1.889	15.436.664	46
GO	97	5.037.522	12.931.552	50.514	182.089	0	18.201.676	55
DF	100	137.455	119.749	3.504	101.853	0	362.561	62
MS	61	2.712.019	10.948.449	1.017.755	61.630	73	14.739.925	68
PR	2	83.534	103.739	66.697	1.892	0	255.863	68
SP	33	3.585.977	2.622.416	533.236	200.445	213	6.942.286	85
Total		21.559.571	54.006.770	3.537.088	889.059	7.870	80.000.357	39

Cerrado na escala de 1:250.000, por meio da segmentação e classificação visual de imagens do Satélite LANDSAT ETM+, georreferenciadas para o sistema de projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) e referencial geodésico SAD69, obtidas de imagens recolhidas em 2002. Toda a análise das imagens foi baseada em composições coloridas RGB das bandas 3, 4 e 5 (ver Seção 2.4). As classes utilizadas para a classificação foram: área natural (vegetação nativa), massa d'água, cultura agrícola, pastagem cultivada, área urbana e reflorestamento. A Figura 2.12 apresenta a distribuição espacial das classes de uso da terra identificadas pelos autores. Devido às datas das imagens e às metodologias utilizadas serem diversas, pequenas divergências entre o mapeamento de Sano et al. (2008) e Ibama (2009) podem existir.

Os resultados apontam que pastagens cultivadas e culturas agrícolas são as duas classes mais representativas de uso da terra, com 26,5 e 10,5% de ocupação do Cerrado, respectivamente. O demonstrativo das áreas ocupadas pelas diferentes classes de uso da terra nos estados cobertos pelo cerrado, pode ser conferido na Tabela 2.2.

Pela análise dos mapeamentos de uso e ocupação da terra no Cerrado, pode-se notar a clara disfunção dos esforços de conservação, quando comparados, por exemplo, ao bioma amazônico. Smith et al. (1998) já discutiam que, ao contrário da Amazônia, é perceptível o não conhecimento ou a não preocupação acerca da intensa exploração do Cerrado. Enquanto há uma preocupação nacional e internacional em preservar a Amazônia pela sua diversidade e importância ambiental, o valor atribuído ao Cerrado reside justamente no

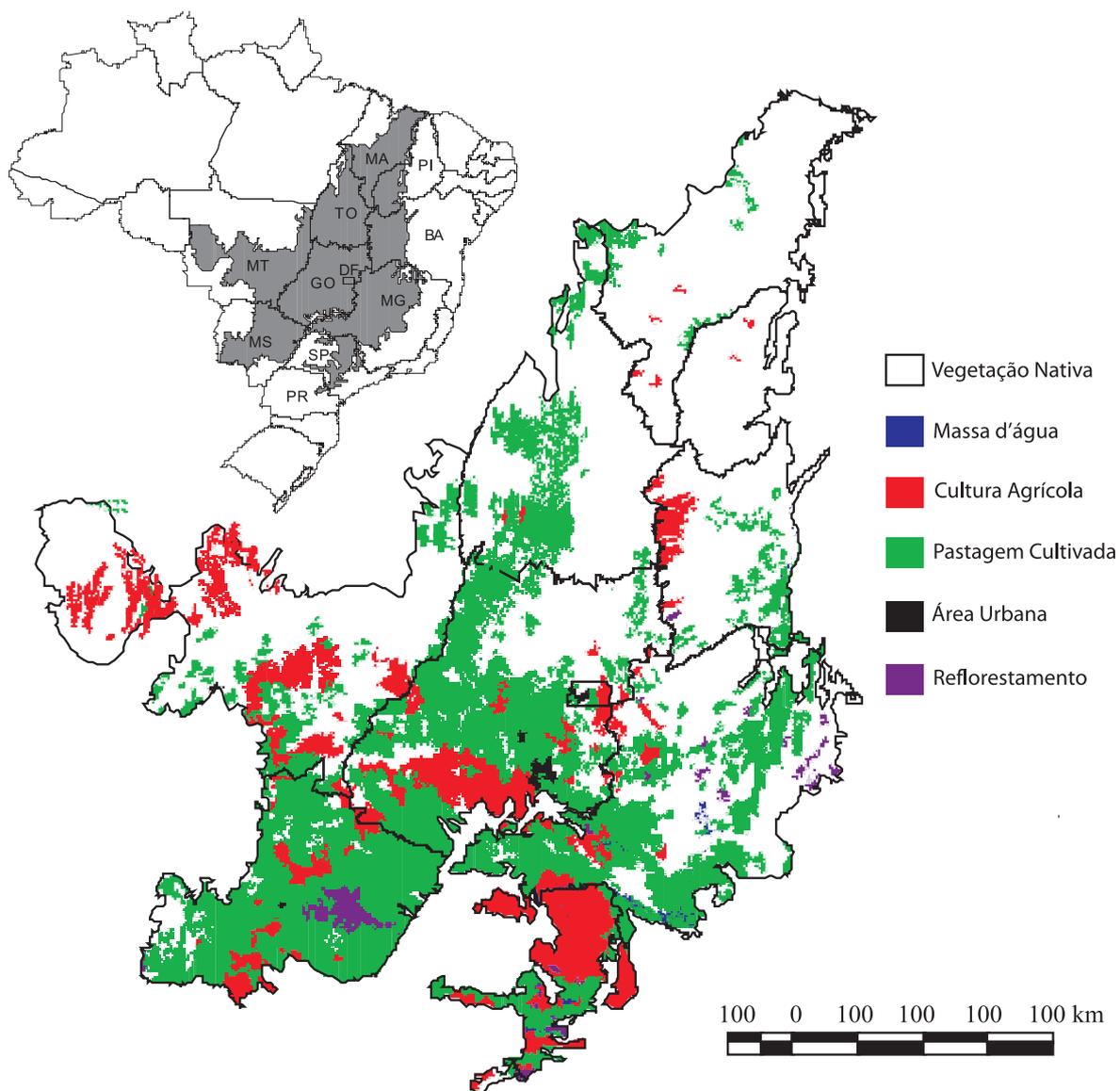


Figura 2.12: Distribuição espacial das classes de uso da terra no bioma Cerrado no ano de 2002 (adaptado de Sano et al. (2008))

seu potencial para a produção agrícola. Apesar de atualmente ser possível constatar que existem discussões em curso e grupos focados na publicitação das implicações ecológicas de intensificação da agricultura no Cerrado, o cenário não alterou sua tendência desde 1998.

Klink e Machado (2005) afirmam que decisões políticas podem explicar a continuidade da destruição dos ecossistemas que constituem o Cerrado. Os autores destacam a discrepância entre as áreas de preservação asseguradas por lei entre os dois biomas, conforme o que dispõe o Código Florestal Brasileiro. Enquanto é exigido que apenas 20% da área dos estabelecimentos agrícolas sejam preservadas como reserva legal no Cerrado, nas áreas de floresta tropical na Amazônia esse percentual é de 80%. Esse montante corresponde a uma área total para conservação de cerca de 33.000km^2 , insuficiente quando comparada aos principais usos da terra no Cerrado.

Além dos óbvios impactos no Cerrado devidos ao desmatamento e conversão do uso da terra, é possível enumerar vários outros aspectos em que os ecossistemas são afetados. Os últimos dados publicados mostram que 17,7% das espécies de fauna do Cerrado (111 espécies) estão ameaçadas de extinção (MMA, 2008). Para Klink e Moreira (2002), a degradação do solo e dos ecossistemas nativos e a dispersão de espécies exóticas são as maiores e mais amplas ameaças à biodiversidade. A fragmentação de habitats, extinção da biodiversidade, invasão de espécies exóticas, compactação e erosão dos solos, poluição de aquíferos, degradação de ecossistemas, alterações nos regimes de queimadas, desequilíbrios no ciclo do carbono e possivelmente modificações climáticas regionais são danos ambientais constatados a partir das transformações ocorridas no Cerrado.

É importante destacar que existem benefícios econômicos advindos da expansão da agricultura no Cerrado. A inclusão social, o aumento na produtividade agrícola, o avanço tecnológico, o crescimento econômico regional, o crescimento populacional nas áreas novas de agricultura e a diversificação da economia local, conforme descrito por Bonelli e Janeiro (2001), são evidentes. Entretanto, Klink e Moreira (2002) argumenta que o aumento da produção se deve mais ao aumento da área de terra cultivada do que devido à ganhos de produtividade. O autor defende que a modernização da agricultura deve permitir o uso da terra de maneira mais intensiva, de modo que nenhuma nova área precise ser limpa. Em teoria, as terras do Cerrado são apropriadas para as atividades agrícolas sustentáveis, o que requer ação pública adequada.

Em quaisquer das aplicações e estudos no Cerrado ou qualquer outra área da superfície da terra, o sensoriamento remoto é uma das principais ferramentas para a obtenção de informações advindas do monitoramento do uso e da cobertura da terra.

2.4 Sensoriamento Remoto

Uma área de grande relevância para o Processamento Digital de Imagens (PDI) é o Sensoriamento Remoto (SR), que consiste na medição ou aquisição de dados sobre um objeto ou cena à distância ou, na obtenção de informações sem entrar em contato direto com a área ou fenômeno sob investigação (IBGE, 2001). A pesquisa em SR intensificou-se no final dos anos 1960 e início dos anos 1970 e, atualmente, esse tipo de aplicação tem sido usado de maneira abrangente e acessível. Os vários satélites têm fornecido uma cobertura frequente e espacialmente extensiva em todo o globo e são uma fonte de dados digitais bas-

tante útil. Outras informações acerca de técnicas relacionadas ao PDI são apresentadas no Apêndice A.

O SR, por meio de sensores, provê dados da observação remota de recursos naturais da Terra. Mediante a interpretação de cenas obtidas por essa técnica, informações relativas aos recursos naturais, como dados sobre agricultura, hidrologia, minerais, florestas e recursos geológicos, podem ser extraídos por meio da análise de imagens obtidas por meio das cenas. Nessas análises, imagens da superfície da Terra são capturadas por sensores em satélites de sensoriamento remoto, ou por um *scanner* multiespectral alocado em uma aeronave, e então transmitidos à uma estação em terra para os processamentos adicionais (Acharya e Ray, 2005). Técnicas de sensoriamento remoto são aplicadas para estudar a disponibilidade de recursos, entre outras aplicações, sendo extremamente relevantes para propósitos de planejamento. De uma maneira geral, a disponibilidade de imagens multi-espectrais tem permitido que pesquisadores se dediquem a tarefas de processamento de alto e baixo nível.

As plataformas de sensoriamento remoto definem os níveis de aquisição dos dados. Segundo Avery e Berlin (1992), os níveis podem ser terrestre, sub-orbital e orbital. Ao nível terrestre o foco das pesquisas reside no estudo sobre como os objetos absorvem, refletem e emitem radiação. Os resultados destas pesquisas geram informações sobre como os objetos podem ser identificados pelos sensores orbitais. Ao nível sub-orbital, os representantes mais disseminados são as fotografias aéreas e os radares, utilizados principalmente para produzir mapas. Já no nível orbital estão as plataformas espaciais, os balões meteorológicos e os satélites. Este é o principal nível de aquisição das pesquisas recentes e, atualmente, é essencial para o acompanhamento de vários fenômenos dinâmicos como a atmosfera, os oceanos, os usos da terra, além de processos biológicos e biogeoquímicos.

Duas classificações podem ser obtidas dos sistemas sensores. A primeira os divide em sistemas imageadores ou não imageadores, conforme o produto gerado (Jensen, 2009). A outra classificação refere-se à fonte da onda eletromagnética, podendo estes serem divididos em passivos (registram apenas ondas eletromagnéticas naturais) ou ativos (utilizam radiação eletromagnética artificial produzida por radares que compõem o próprio sensor).

A resolução dos sensores também merece uma breve apresentação de conceitos. A resolução pode ser estudada sob as óticas espacial, espectral, radiométrica e temporal (Campbell, 1996; IBGE, 2001). Resolução espacial pode ser definida como a habilidade que um sensor possui de distinguir objetos que são próximos espacialmente. Cada sensor é projetado para fornecer dados a um determinado nível de detalhe espacial. Quanto menor o objeto possível de ser identificado, maior a resolução espacial. A referência mais usada para a resolução espacial, é o tamanho do *pixel*. Em geral, só objetos maiores do que a área do *pixel* podem ser identificados.

A resolução espectral é definida como a habilidade de separar coisas espectralmente semelhantes. A capacidade de discriminação dos materiais da superfície da terra por SR fundamenta-se no comportamento dos mesmos ao longo do espectro eletromagnético. Uma premissa fundamental em SR é a possibilidade de identificar materiais pela sua resposta espectral característica em diferentes faixas de comprimento de onda. Diferentes materiais podem ter respostas espectrais semelhantes em um determinado intervalo de comprimento de onda e respostas distintas em outra faixa do espectro. Portanto, quanto maior o número de canais espectrais, maior a capacidade discriminatória.

Os níveis de cinza dos *pixels* são representados por números inteiros que se enquadram dentro de um determinado intervalo. Quanto maior o intervalo entre os níveis de cinza máximo e mínimo, maior a resolução radiométrica. A resolução radiométrica caracteriza o nível de quantização ou sensibilidade do sensor em detectar pequenas variações radiométricas. Finalmente, a resolução temporal é definida em função do tempo de revisita do sensor para um mesmo ponto da superfície terrestre. É também referida como periodicidade ou repetitividade. A resolução temporal do LANDSAT/TM é de 16 dias.

Atualmente, a vasta disponibilidade de imagens provenientes do sensoriamento remoto são resultado da tecnologia dos satélites orbitais. Existem vários satélites em operação, entre eles as séries LANDSAT³, SPOT⁴, CBERS⁵, IKONOS⁶, QUICKBIRD⁷ e NOAA⁸. Enquanto os satélites NOAA são destinados para fins meteorológicos, para o estudo dos processos climáticos e atmosféricos, todos os demais têm por fim o monitoramento e levantamento dos recursos naturais terrestres.

O sistema LANDSAT (*LAND SATellite*) foi o primeiro a obter imagens terrestres de forma sistemática. O primeiro satélite LANDSAT foi lançado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), nos Estados Unidos, em 1972. Sua função, à época, consistia em obter e transmitir imagens da Terra a partir do espaço, com o propósito de monitorar as condições ambientais do planeta, propósito que permanece até hoje. A série passou por inovações, especialmente nos sistemas de sensores que ampliaram sua resolução espectral, inicialmente captando quatro e atualmente captando sete bandas espectrais.

O último satélite a ser posto em órbita, o LANDSAT 7, em 1999, é equipado com os sensores ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Possui sete bandas espectrais, variando do visível ao infra-vermelho, com resolução espacial de 30m, detector de sensibilidade e resolução radiométrica bastante aprimorados em relação aos primeiros modelos da série. Todas essas características fornecem informação com grande precisão radiométrica, produzindo detalhes melhores e acentuando as diferentes categorias de objetos. Essas características fizeram com que a série LANDSAT fosse a fonte de imagens mais utilizada para uma variedade de estudos e aplicações. No Brasil, as imagens produzidas pelo LANDSAT ETM+ são amplamente utilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em parceria com os órgãos responsáveis pela governança ambiental (MMA, Ibama, entre outros) para o controle do desmatamento dos biomas brasileiros e monitoramento dos recursos naturais (ver Seção 2.3.2).

A Tabela 2.3 mostra as chamadas *bandas temáticas* no satélite LANDSAT 7. As bandas são expressas em termos de comprimento de onda λ , com $1\mu m = 10^{-6}m$. A reflectância espectral dos objetos terrestre varia com o comprimento de onda e permite que diferentes bandas sejam utilizadas para obter informações específicas. O registro gráfico da reflectância ao longo do espectro eletromagnético fornece uma curva que descreve as propriedades radiométricas de um determinado material. Esta curva típica de cada material constitui um padrão para identificação dos alvos de estudo por sensoriamento

³<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

⁴<http://www.spotimage.com/>

⁵<http://www.cbers.inpe.br/>

⁶<http://www.geoeye.com/>

⁷<http://www.digitalglobe.com/company/content-collection/quickbird>

⁸<http://www.weather.gov/>

Tabela 2.3: Características e usos das bandas espectrais do LANDSAT 7 (adaptado de IBGE (2001)).

Nº Banda	Nome	Comprimento de onda μm	Características e Usos
1	azul	0.45-0.52	Estudos de sedimentos na água Mapeamento de águas costeiras Diferenciação solo/vegetação
2	verde	0.52-0.60	Estradas e áreas urbanas Mapeamento da vegetação (maior reflectância dos canais do visível)
3	vermelho	0.63-0.69	Discriminação da vegetação verde e sadia - atividades fotossintéticas
4	infravermelho próximo	0.76-0.90	Levantamento de biomassa Delineamento de corpos d'água
5	infravermelho médio	1.55-1.75	Umidade da vegetação e solos Mapeamento de rios e corpos d'água
6	infravermelho termal	10.4-12.5	Estresse térmico em vegetação Propriedades termais dos solos e rochas
7	infravermelho distante	2.08-2.35	Estudos de rochas e minerais Umidade do solo e vegetação
8	pancromática	0.52- 0.90	Resolução espacial de 15m - conjugada com as outras bandas gerando uma imagem de boa separabilidade dos alvos de interesse

remoto. Sabe-se, por exemplo, que a biomassa vegetal é sensível à faixa $0.77\mu - 0.86\mu\text{m}$, enquanto a clorofila é mais sensível à faixa $0.62\mu - 0.68\mu\text{m}$.

Um exemplo de imagem multiespectral é apresentado na Figura 2.13, que mostra uma composição colorida RGB das bandas 3, 4 e 5 do satélite LANDSAT, de parte da área do Distrito Federal, evidenciando Brasília, e de parte leste do estado de Goiás, utilizada para o mapeamento da cobertura vegetal natural e antrópica do bioma Cerrado. Tais imagens são classificadas para que um panorama da cobertura vegetal do Cerrado seja conhecido. É possível notar as reflectâncias características dos corpos d'água, das áreas sob ação antrópica (urbanização e agricultura) e as áreas de vegetação remanescente.

A classificação automática dos *pixels* de uma imagem envolve a associação de cada *pixel* da imagem com um nome que descreve um objeto real. Se a classificação é executada para todos os *pixels* de uma imagem, o resultado é um mapa temático mostrando a distribuição de categorias (vegetação, solo, uso da terra etc) que são denominadas classes. A partir das imagens classificadas, a informação útil para determinado objetivo pode ser obtida e disponibilizada. A classificação é implementada com base nas diferenças de comportamento dos materiais ao longo do espectro eletromagnético. Várias abordagens estatísticas, baseadas em conhecimento, redes neurais, entre outras, têm sido propostas para a classificação das cenas obtidas remotamente. Com o aumento da resolução dos sensores espaciais, espectrais e temporais, técnicas mais avançadas e eficientes são necessárias para a classificação e interpretação desses dados (Acharya e Ray, 2005; IBGE, 2001).

No contexto da concepção e do desenvolvimento de modelos de simulação de mudanças no uso e na cobertura da terra, que é o foco do estudo em questão, o sensoriamento remoto representa uma importante fonte de dados, uma vez que possibilita descrever, a partir de informações visuais, as mudanças de padrões espaciais entre instantes de tempo distintos.

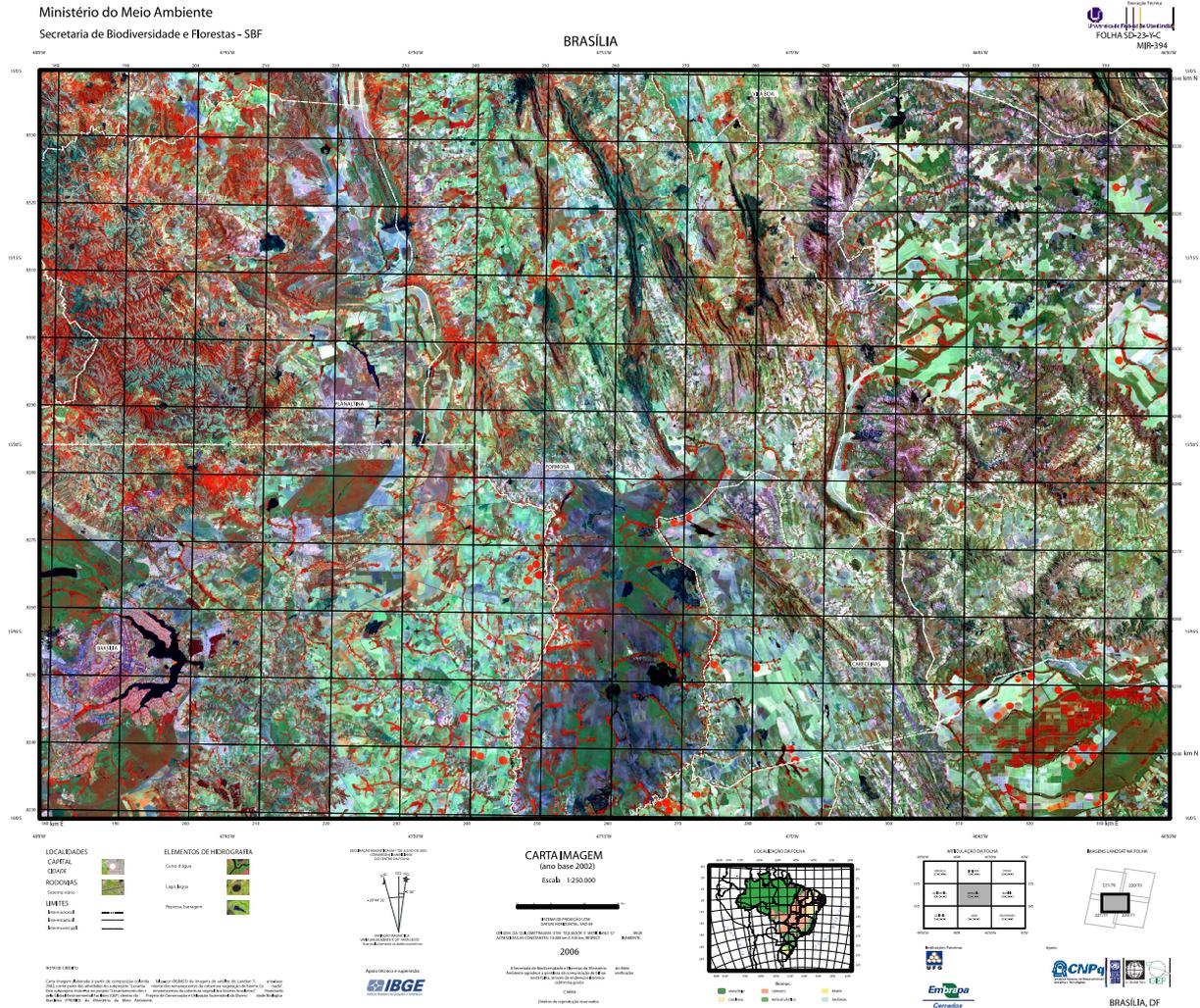


Figura 2.13: Exemplo de carta imagem que recobre partes do Distrito Federal e leste de Goiás ((Sano et al., 2010)).

Segundo Turner et al. (2001), o sensoriamento remoto caracteriza-se como a principal fonte de dados para o desenvolvimento, calibração e refinamento de modelos ecológicos, em especial os modelos de dinâmica de paisagens.

É desejável que uma ferramenta de simulação opere com imagens reais, o que torna imprescindível o conhecimento dos modos de representação para a composição de imagens. Além disso, a avaliação das mudanças que ocorrem no espaço se dá pela análise de propriedades de um conjunto de imagens, pela aplicação de operações lógicas e aritméticas, limiarização (*thresholding*), filtragem no domínio da frequência, entre outros, a depender do objetivo.

O entendimento das questões relacionadas ao uso e cobertura da terra são essenciais para a descrição dos agentes de *software* a serem implementados na ferramenta. Esses agentes são a base do SMA, cujos fundamentos são apresentados no Capítulo 3.

Capítulo 3

Sistema Multiagente

Para o propósito deste trabalho, define-se IA como o ramo da Ciência da Computação que estuda a automação do comportamento inteligente (Luger, 2005). Russel e Norvig (2010) são mais específicos ao caracterizarem essa área do conhecimento como a pesquisa por sistemas que agem racionalmente. O agir racionalmente é uma ação que pode envolver o tratamento de incertezas, inferências e reflexos. Essas definições estão em sintonia com o estado da arte da IA, que investe no fortalecimento da área de pesquisa, tanto em conteúdo quanto em metodologia, pela fundamentação de afirmações em experimentações rígidas e pelo destaque à relevância de aplicações reais, em vez de exemplos fictícios.

Um dos ramos emergentes da IA, a IAD refere-se a sistemas que buscam soluções colaborativas por um grupo de entidades distribuídas (Weiss, 2000). Da pesquisa nessa área surgem os Sistema Multiagente (SMA), na busca por reproduzir o conhecimento e o raciocínio de vários agentes heterogêneos, os quais necessitam de coordenação para a resolução de problemas (Bousquet e Le Page, 2004).

Este capítulo aborda os principais fundamentos de agentes inteligentes e SMA, bem como aspectos relevantes de metodologias, protocolos e especificações. Apresenta também, aspectos da aplicação de SMA em domínios ambientais.

3.1 Agente Inteligente

A unidade conceitual no estudo de sistema multiagente é a de agente inteligente. Por mais que essa conceituação seja condição precípua para a pesquisa em SMA, ainda há divergências em relação ao termo. Uma definição básica de agente é dada por Wooldridge (2009), ao estabelecer que um agente é um sistema computacional que se situa em um ambiente e é capaz de agir de maneira autônoma para cumprir os seus objetivos definidos no projeto. Para isso é necessário apresentar características como:

- Autonomia - exercer controle sobre suas próprias ações;
- Reatividade - perceber o ambiente e responder às mudanças;
- Proatividade - decidir por si mesmo o curso de ação para atingir seus objetivos;
- Sociabilidade - interagir com os demais agentes em situações complexas por meio de negociação, cooperação e coordenação.

Russel e Norvig (2010) definem agente como uma entidade capaz de perceber o seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre o ambiente por meio de atuadores. Os autores definem o que seria um agente racional: para cada sequência possível de percepções, um agente racional deve selecionar uma ação que se espera venha a maximizar sua medida de desempenho, dada a evidência fornecida pela sequência de percepções e por qualquer conhecimento interno do agente. A ação de um agente é escolhida de um rol de capacidades, baseada em pré-condições fornecidas pelo ambiente, ou seja, a inteligência reside em escolher quais ações serão as mais adequadas para que um objetivo seja satisfeito.

Um agente é completamente especificado pela “função do agente”, que mapeia a sequência de percepções em ações (Russel e Norvig, 2010). O projeto de um agente inteligente deve especificar qual a sua percepção, suas ações, objetivos e qual o seu ambiente, ou seja, o *Performance Environment Actuators Sensors* (PEAS). Arquiteturas de agentes são, dessa maneira, arquiteturas de *softwares* para sistemas de tomada de decisão que estão embarcados em um ambiente (Wooldridge, 2009).

Quanto ao tipo de estrutura, é possível classificar os agentes inteligentes em quatro tipos básicos (Russel e Norvig, 2010):

- Agentes reativos simples - tipo mais simples de agente, sua ação depende unicamente da percepção atual. Podem ser descritos com regras de produção, tendo por algoritmo geral o ciclo *Interpretar entrada, Verificar regra correspondente e Agir conforme a regra*;
- Agentes reativos baseados em modelos - também conhecidos como agentes reativos com registro de estado, essa classe de agentes mantém um estado interno com base no seu histórico de percepções e no estado do ambiente, conforme apresentado na Figura 3.1;
- Agentes baseados em objetivos - além de manterem um estado interno, possuem informações de objetivos que descrevem situações desejáveis, e as utilizam para tomar suas decisões;
- Agentes baseados em utilidade - além de considerarem seus objetivos, possuem uma função de utilidade que embasa suas decisões. O agente sempre escolherá a ação que leva a uma maior utilidade.

Segundo Sycara (1998), a capacidade de um agente inteligente é limitada pelo seu conhecimento, seus recursos computacionais e sua perspectiva. Logo, problemas complexos de maior escala estão acima das capacidades de um único agente inteligente. Também segundo Ferber (1999), a inteligência não pode ser separada do contexto social, ou seja, não é possível considerar os agentes apenas como entidades inteligentes isoladas. Observações como essas impulsionam trabalhos na área de SMA.

3.2 Fundamentos de SMA

Os SMAs são sistemas compostos por diversos agentes, onde cada um deve possuir conhecimento e habilidades para executar uma determinada tarefa, podendo cooperar ou competir, para atingir um objetivo global. SMA é um campo relativamente novo na Ciência da Computação. Segundo Wooldridge (2009), a área começou a ser estudada nos

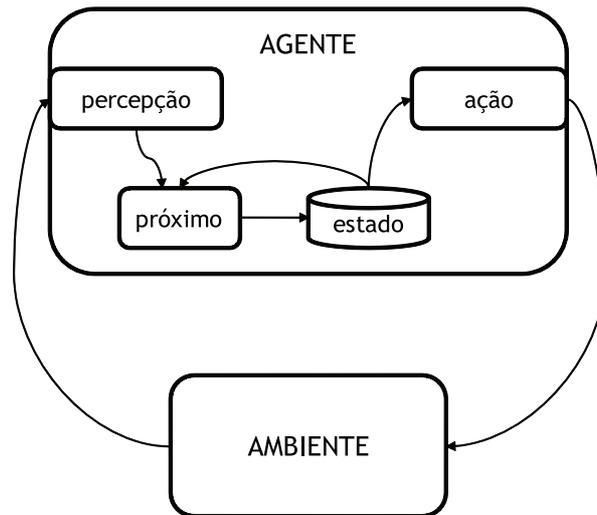


Figura 3.1: Agentes com registro de estado consultam um modelo interno antes de agirem reativamente (adaptado de Wooldridge (2009)).

anos 80, e só ganhou reconhecimento em meados dos anos 90. Entretanto, o interesse tem crescido rapidamente, impulsionado pela constatação de que agentes são um paradigma de *software* apropriado para explorar necessidades apresentadas pelas modernas plataformas de computação e informação: distribuídas, abertas, de grande volume e heterogêneas.

Outra razão para o desenvolvimento da área é que os conceitos subjacentes à SMA não são restritos a um único domínio de aplicação, sendo especialmente interessantes no desenvolvimento e análise de modelos e teorias de interatividade nas sociedades humanas. Isso se dá devido a SMA ser considerado uma metáfora natural para o entendimento e construção de uma ampla faixa do que podem ser rudemente denominados de *sistemas artificiais sociais* (Weiss, 2000; Wooldridge, 2009).

Uma definição de SMA, especialmente significativa para pesquisadores das ciências ambientais, é dada por Ferber (1999), quando apresenta que SMA é composto por:

1. Um ambiente E , que é usualmente um espaço;
2. Um conjunto de objetos O , sendo que em um dado momento é possível associar qualquer objeto a uma posição em E ;
3. Um conjunto de relações R , que ligam os objetos uns aos outros;
4. Um conjunto de operações Op , sendo possível que os agentes percebam, produzam, transformem e manipulem os objetos em O ;
5. Operadores com a tarefa de representar a aplicação dessas operações e a reação do mundo a essa tentativa de modificação, que o autor chama de leis do universo.

Segundo Sycara (1998), as características de SMA são tais que:

1. Cada agente possui uma visão limitada;
2. Não há controle global do sistema;
3. Trabalham com dados descentralizados; e

4. A computação é assíncrona, de maneira a permitir a comunicação entre entidades heterogêneas.

Para [Wooldridge \(2009\)](#), SMA contém um número de agentes que interagem por comunicação, são capazes de agir em um ambiente, possuem diferentes esferas de influência, e são ligados uns aos outros por relações organizacionais, como ilustrado na Figura 3.2. Cada agente possui diferentes controles sobre diferentes partes do ambiente, podendo ou não existir sobreposição de nicho entre eles. O fato de essas esferas poderem coincidir faz surgir dependências entre os agentes. Os agentes também estão ligados por outros relacionamentos hierárquicos.

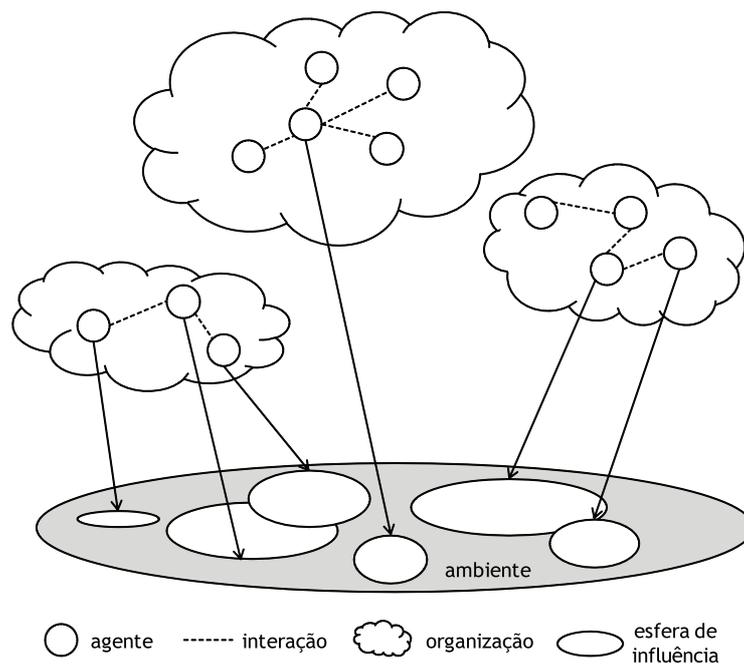


Figura 3.2: Visão Geral de um SMA (adaptado de [Wooldridge \(2009\)](#)).

É possível que em um SMA, cada agente tenha suas próprias preferências e desejos de como o mundo deveria ser. Para que o objetivo global do projeto seja alcançado, os agentes precisam trabalhar juntos. Essa atividade envolve coordenação em diferentes níveis, como compartilhar informação e recursos, em interações que podem ser cooperativas ou não. Diante dessa complexidade, faz-se necessário explorar os conceitos gerais de SMA, de modo a apresentar as bases teóricas que fundamentam a proposta deste trabalho de pesquisa.

3.2.1 Ambientes

Ambiente é o substrato onde atuam os agentes. [Weyns et al. \(2006\)](#) afirmam que todos os elementos não-agentes de um SMA são tipicamente considerados parte do ambiente, como bancos de dados, comunicações, infraestrutura, recursos, entre outros. Definem ambiente como as condições circundantes para que os agentes existam, que coordenam a interação entre eles e o acesso aos recursos.

O projeto de um SMA depende primeiramente de como é o ambiente em que os agentes vão atuar. Quanto mais limites sobre o ambiente, ou quanto mais estático ele é, mais fácil o

projeto dos agentes. Segundo [Russel e Norvig \(2010\)](#), é possível caracterizar os ambientes conforme alguns parâmetros:

- Completamente Observável ou Parcialmente Observável - um ambiente é completamente observável se os sensores detectam todos os aspectos que são relevantes para a escolha da ação. Os agentes não precisam manter qualquer estado interno para controlar o ambiente. Um ambiente pode ser parcialmente observável devido a sensores imprecisos;
- Determinístico ou Estocástico - se o próximo estado do ambiente é completamente determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente, diz-se que o ambiente é determinístico. Caso contrário, é estocástico, seja pela presença de incerteza, pela dificuldade em prever o comportamento de elementos não observados etc;
- Episódico ou Sequencial - ambientes episódicos são aqueles em que a ação do agente é atômica e depende somente da percepção do agente. Ambientes sequenciais são mais complexos que ambientes episódicos porque uma decisão atual pode afetar uma decisão futura;
- Estático ou Dinâmico - se o ambiente puder ser alterado enquanto um agente está deliberando, diz-se que o ambiente é dinâmico para o agente. Caso contrário, é estático;
- Discreto ou Contínuo - essa dimensão define o modo como o tempo é tratado no ambiente em relação à percepção do agente. Quando o tempo ou o número de estados é finito, tem-se que o ambiente é discreto. Se as variáveis envolvidas variam por um intervalo de valores contínuos, o ambiente é contínuo.

Quanto mais dinâmico o ambiente, ou seja, se é parcialmente observável, não-determinístico, sequencial ou contínuo, maior será a complexidade dos agentes.

3.2.2 Comunicação

[Russel e Norvig \(2010\)](#) definem comunicação como a troca intencional de informações provocada pela produção e percepção de sinais extraídos de um sistema compartilhado. Nesse contexto, a linguagem é um sistema de mensagens estruturadas. Um ato de fala (*speech act*), ou ato comunicativo, é a ação de um agente em produzir linguagem.

Segundo [Bellifemine et al. \(2007\)](#), um dos componentes chave dos SMA é a comunicação. Para atingir um objetivo, muitas vezes os agentes precisam ser capazes de comunicarem-se com usuários, com os recursos do sistema e principalmente com os demais agentes. A comunicação é condição precípua para que os agentes cooperem, colaborem ou negociem.

Agentes interagem uns com os outros usando uma linguagem, denominada de maneira geral como linguagem de comunicação de agentes. Nos anos 90, várias linguagens foram desenvolvidas pelo governo americano, especificamente para a comunicação de agentes, pela *Knowledge Sharing Effort* (KSE). O grupo tinha a missão de desenvolver protocolos para a troca e representação do conhecimento entre sistemas de informação autônomos. O KSE gerou a primeira linguagem de comunicação com grande abrangência de utilização, o *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML) ([Mayfield et al., 1996](#)).

O KQML é uma linguagem e protocolo para a troca de informações e conhecimento, baseado em mensagens. A linguagem define um formato para as mensagens, não se preocupando com o conteúdo a ser enviado pelos agentes. Uma mensagem KQML pode ser definida, em linhas gerais com uma ação performativa e um conjunto de parâmetros.

Performativas são enunciados que não podem ser classificados como verdadeiros ou falsos, segundo a lógica proposicional. Searle (1969) classifica as performativas em 5 classes:

- Representativas - expressam uma crença do receptor, ou seja, o locutor comunica que acredita na verdade do enunciado;
- Comissivas - expressam promessas. Mostram que o locutor está comprometido com uma ação futura;
- Declarativas:- alteram o estado do ambiente e afirmam fatos;
- Diretivas - expressam um pedido ou comando. É a performativa utilizada para solicitações;
- Expressivas - expressam desculpas, agradecimentos ou estados psicológicos;
- Vereditas - expressam um julgamento.

Atualmente, a mais usada e estudada linguagem de comunicação de agentes é a FIPA ACL - *Agent Communication Language* (FIPA, 2003), que incorpora muitos aspectos do KQML. Em 1996, a *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA) iniciou o seu trabalho de desenvolvimento de padrões para sistemas baseados em agentes. O objetivo principal dessa iniciativa era o desenvolvimento de uma ACL. Essa ACL é similar ao KQML: define uma linguagem formato para as mensagens, juntamente com a definição de 20 performativas para definição das interpretações pretendidas das mensagens, e não faz qualquer indicação ou restrição de linguagem para o conteúdo da mensagem. Ademais, uma característica primária da FIPA ACL é a possibilidade de utilização de gerentes de conversação por meio de protocolos de interação pré-definidos. Apesar de semelhantes, a mais importante diferença entre KQML e FIPA ACL é o conjunto de performativas que cada linguagem provê.

A FIPA também se preocupou em determinar uma semântica formal para a comunicação entre agentes. A semântica foi criada em relação a uma linguagem formal chamada *Semantic Language* (SL). Essa linguagem permite a representação de crenças, desejos e incertezas dos agentes, bem como as ações que esses agentes executam. A semântica da FIPA mapeia cada mensagem ACL a uma fórmula de SL, que define uma restrição que o remetente da mensagem deve satisfazer se quiser ser considerado em conformidade com o padrão FIPA ACL. Essa restrição é denominada *condição de viabilidade*.

A visão geral das especificações da FIPA é apresentada na Seção 3.3.1. Neste trabalho, a comunicação dos agentes utiliza os padrões e linguagem FIPA ACL.

3.2.3 Arquiteturas

Arquiteturas de agentes são os mecanismos fundamentais subjacentes aos componentes autônomos que fornecem o suporte ao comportamento efetivo no mundo real, ambientes dinâmicos e abertos. Esforços iniciais do paradigma de agentes de *software* focaram

no desenvolvimento de arquiteturas de agentes inteligentes. Conforme [Bellifemine et al. \(2007\)](#), dessas pesquisas surgiram as definições de 4 tipos principais de arquitetura: arquiteturas baseadas em lógica, arquiteturas reativas, arquiteturas baseadas em crenças, desejos e intenções (BDI - *Believe Desire Intention*) e arquiteturas em camadas.

Arquiteturas baseadas em lógica derivam do ramo da IA simbólica, e seus agentes também são conhecidos como de raciocínio dedutivo. Contêm um ambiente que é simbolicamente representado e manipulado pelo uso de mecanismos de formalização matemática. Um benefício dessa abordagem é que o conhecimento humano é simbólico, então a codificação é mais fácil e, no fim, uma solução elegante é gerada. Entretanto, há duas conhecidas desvantagens: o problema da transdução (a dificuldade de se traduzir o mundo real em uma descrição simbólica adequada e precisa); e o problema da representação/raciocínio (o problema de conseguir que os agentes manipulem e raciocinem utilizando essa informação, em tempo útil) ([Wooldridge, 2009](#)).

Arquiteturas reativas implementam a tomada de decisão como um mapeamento direto de uma situação que se apresenta para uma ação que será executada. Geralmente são baseadas em mecanismos de estímulo-resposta, acionados por sensores de dados. Não possuem modelos simbólicos ou de raciocínio dedutivo ([Bellifemine et al., 2007](#)). Essas arquiteturas têm como principal exemplo o trabalho de [Brooks \(1991\)](#), de *arquitetura de subsunção*, que aponta que o comportamento inteligente pode ser gerado sem uma representação explícita e que a inteligência é uma propriedade emergente de alguns sistemas complexos.

Arquiteturas BDI são bastante populares e definem atitudes mentais de crenças, desejos e intenções usando lógica modal. Esse tipo de arquitetura, denominada por [Wooldridge \(2009\)](#) como de raciocínio prático, é direcionada às ações, ou seja, às condições de como o agente deve descobrir o que fazer. O raciocínio prático é uma questão de se balancear considerações conflitantes a favor e contra opções que competem entre si, onde as considerações relevantes são fornecidas pelos desejos/valores/importância daquilo que o agente crê.

Arquiteturas em camadas ou arquiteturas híbridas permitem ambos os comportamentos reativos e deliberativos dos agentes. Para permitir essa flexibilidade, faz-se necessária a criação de subsistemas organizados em uma hierarquia de camadas interativas, para acomodar os dois tipos de comportamentos dos agentes ([Bellifemine et al., 2007](#)). É possível caracterizar dois tipos de fluxos de controle nas arquiteturas em camadas, como ilustrado na Figura 3.3: horizontal ([Ferguson, 1991](#)) e vertical ([Muller et al., 1995](#)).

Nas camadas horizontais, cada camada é diretamente conectada a um sensor de entrada e a uma ação de saída Figura 3.3(a). Essencialmente, cada camada age como se fosse um agente. A maior vantagem dessa arquitetura é a simplicidade de projeto, uma vez que se um agente n precisa de diferentes tipos de comportamentos, então a arquitetura só precisa de n camadas. Entretanto, desde que cada camada é, com efeito, um agente, é possível que ações conflitantes ou inconsistentes sejam sugeridas, sendo necessária uma função mediadora para o controle dessas ações.

Uma arquitetura vertical em camadas resolve essa questão à medida que os sensores de entrada e a saída de uma ação são cada um aferidos por até uma camada, eliminando-se as inconsistências nas ações sugeridas. A arquitetura vertical em camadas pode ser subdividida em arquiteturas de controle em uma via (*one pass control*) ou em duas vias (*two pass control*). Nas arquiteturas verticais em uma via, Figura 3.3 (b), os fluxos de

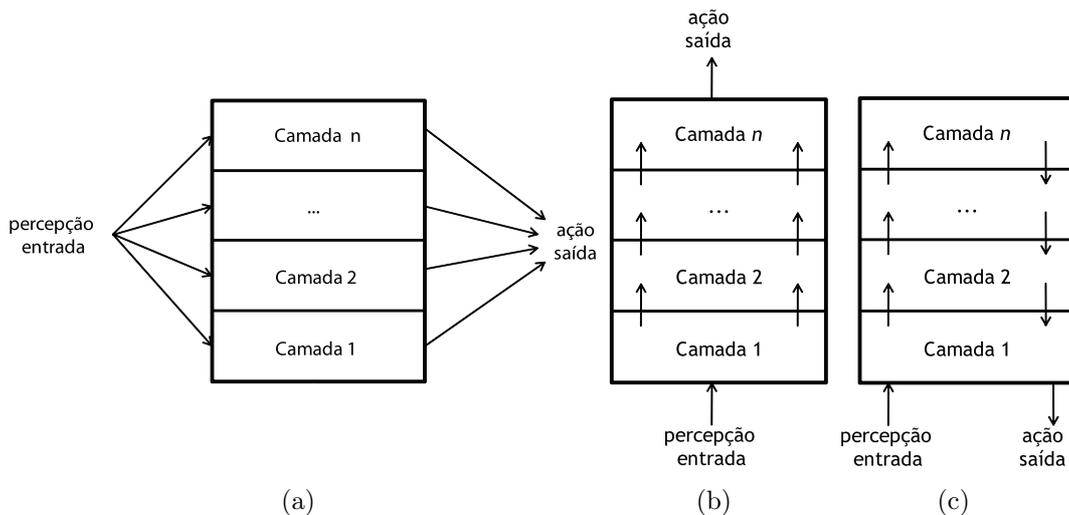


Figura 3.3: Fluxo de dados e controle nas arquiteturas em camada. (a) Camadas Horizontais; (b) Camadas Verticais com controle em uma via; (c) Camadas Verticais com controle em duas vias (adaptado de Wooldridge (2009)).

controle da camada inicial obtêm dados de sensores para a camada final, que gera a saída de uma ação. Já nas arquiteturas verticais em duas vias, Figura 3.3 (c), os fluxos de dados fluem por toda a extensão das camadas de controle e depois fluem novamente, pela sequência de camadas, em sentido contrário. A desvantagem dessa abordagem é que a arquitetura depende de todas as camadas e não é tolerante a falhas.

3.2.4 Coordenação

O termo coordenação é frequentemente usado em ambientes concorrentes para descrever sistemas que necessitam interagir uns com os outros de modo a cumprir tarefas que lhes são designadas (Wooldridge, 2009). Segundo Bellifemine et al. (2007), coordenação é um processo no qual agentes se comprometem em ajudar a garantir que uma comunidade de agentes individuais ajam de maneira coerente. São várias as razões pelas quais o SMA necessita ser coordenado, tais como:

1. Os objetivos dos agentes podem causar conflitos entre as suas ações;
2. Os objetivos dos agentes podem ser interdependentes;
3. Agentes podem ter diferentes capacidades e diferentes conhecimentos; e
4. Metas globais do sistema podem ser alcançadas mais rapidamente se diferentes agentes agirem em cada subproblema.

A coordenação entre agentes pode ser tratada por uma série de abordagens, incluindo *contracting*, planejamento multiagente, negociação, estruturação organizacional, entre outros.

Uma importante técnica de coordenação em ambientes concorrentes é o protocolo *Contract net* (Smith, 1980), que se baseia em uma estrutura de mercado descentralizado, onde agentes podem demandar serviços, informações ou recursos a outros agentes. A

premissa básica é que se um agente não consegue resolver um problema usando o seu conhecimento ou recursos locais, então ele irá decompor o problema em sub-problemas e tentar encontrar agentes dispostos e com conhecimento necessário para resolver cada um dos sub-problemas.

Outra abordagem amplamente difundida é encarar o problema de coordenação dos agentes como um problema de planejamento. Para evitar ações e interações inconsistentes ou conflitantes, os agentes podem construir um plano que detalha todas as ações e interações futuras necessárias para atingir seus objetivos.

A negociação é provavelmente a técnica mais utilizada para a coordenação de agentes. Consiste em um processo de comunicação de um grupo de agentes, de modo a atingir um consenso em alguma questão. A negociação pode ser competitiva ou cooperativa, dependendo do comportamento dos agentes envolvidos (Wooldridge, 2009).

A abordagem organizacional provê uma estrutura para atividades e interação por meio da definição de papéis, caminhos de comunicação e relações de autoridade (Durfee, 2000). O modo mais fácil de garantir comportamentos coerentes e resolver conflitos consiste em prover o grupo com um agente que possui uma perspectiva mais ampla do sistema, explorando, assim, uma estrutura organizacional ou hierárquica (Bellifemine et al., 2007). Essa é a mais simples técnica de coordenação e produz uma arquitetura clássica cliente/servidor, ou escravo/mestre, para tarefas e alocação de recursos entre agentes-clientes executadas por um agente-servidor.

Segundo Horling (2005), os agentes superiores na hierarquia conseguem reunir informação dos agentes dos níveis inferiores por terem uma visão mais global, podendo assim criar planos e designar tarefas para agentes individuais, de modo a garantir a coerência global. São esses agentes que possuem a informação e a autoridade organizacional para tomar as decisões. Assim, o conjunto de agentes dispostos em um hierarquia teria cada nível a atuar como um filtro, explicitamente transferindo informações e implicitamente transferindo decisões para o topo da hierarquia, quando necessário.

A eficiência da hierarquia deriva da decomposição em níveis, em um típico problema dividir-e-conquistar, permitindo ao sistema utilizar grandes grupos de agentes de maneira eficiente e tratar de problemas de maior escala. Essa técnica de coordenação restringe os agentes a um número de interações que é pequeno em relação ao grupo total dos agentes, permitindo o aumento do paralelismo e maior tratabilidade de ações de controle local e de tomada de decisões (Horling, 2005).

Entretanto, Bellifemine et al. (2007) afirma que essa abordagem não é prática em algumas aplicações pois é muito difícil a criação de um controle central, e, dependendo do domínio da aplicação, pode ser contrária à natureza descentralizada dos SMAs. Horling (2005) também apontam que utilizar uma hierarquia pode levar a uma organização rígida e frágil, suscetível a gargalos, caso o escopo das decisões de controle ou do recebimento das informações não forem gerenciados de maneira eficiente.

A proposta desse trabalho baseia-se na técnica hierárquica de coordenação, devido a escalabilidade da abordagem, por simplificar a coordenação, distribuição dos recursos e a resolução de conflitos entre o grande número de agentes envolvidos na proposta do SMA. A organização do sistema é detalhada na 5.3.1. A adoção da organização hierárquica também justifica-se pela similaridade que apresenta em relação às organizações sociais propostas no estudo de caso, apresentado no Capítulo 6.

3.2.5 Metodologia

Uma metodologia busca especificar todos os elementos necessários para o desenvolvimento de um sistema de *software*. Desse modo, devido à natureza dos agentes e suas interações, a engenharia de SMA requer metodologias específicas para o apoio ao desenvolvimento de sistemas baseados em agentes (Wooldridge, 2009). Inúmeras metodologias para o desenvolvimento de sistemas baseados em agentes já foram propostas, entretando, sua aplicação é limitada devido à falta de maturidade na maioria das metodologias (Dam e Winikoff, 2003). De maneira geral são denominadas metodologias AOSE (*Agent Oriented Software Engineering*).

Henderson-Sellers e Giorgini (2005), Wooldridge (2009) e Dam e Winikoff (2003), apresentam a comparação de diversas metodologias como *Multi-agent Systems Engineering*, Prometheus, Tropos, Gaia, *Australian Artificial Intelligence Institute* (AAII). Um panorama dessas metodologias, quase todas com o seu início atrelado aos conceitos de Orientação a Objeto (OO), é ilustrado na Figura 3.4. Após a avaliação dessas metodologias, optou-se por aplicar a metodologia Prometheus no desenvolvimento do SMA proposto.

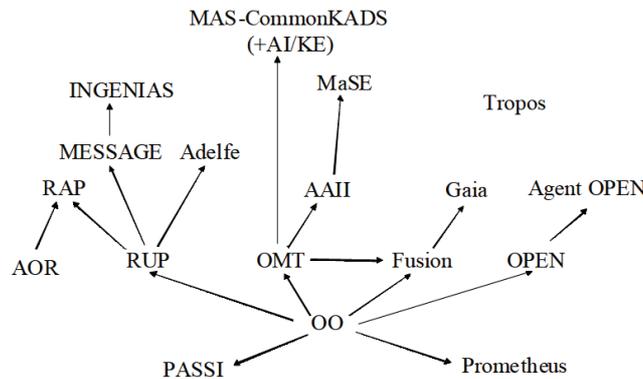


Figura 3.4: Metodologias AOSE (Henderson-Sellers e Giorgini, 2005).

De uma perspectiva de planejamento e execução de IA, Prometheus provê uma rica abordagem orientada a objetivo para os seus agentes. É uma metodologia detalhada e completa, de modo que não é necessário ser especialista no desenvolvimento de agentes inteligentes para aplicá-la. Outra característica interessante é que a metodologia foi desenvolvida a partir de experiências pedagógicas e na indústria, e conta com uma comunidade de apoio à sua utilização, formada por estudantes, pesquisadores e desenvolvedores comerciais, o que contrasta com o grau de utilização das demais metodologias. A utilização da Prometheus também se justifica pela flexibilidade e pelo grau de complexidade dos agentes, que é permitido alcançar, já que a metodologia permite a especificação do agente em níveis de BDI, não os tratando como caixas-pretas (Dam e Winikoff, 2003; Padgham e Winikoff, 2005).

A metodologia Prometheus (Padgham e Winikoff, 2005) consiste de três fases principais:

- **Especificação do Sistema**, que foca na identificação das metas e funcionalidades básicas do sistema, e especifica e interface entre o sistema e o seu ambiente em termos de entradas (percepções) e saídas (ações);
- **Projeto de Arquitetura**, que utiliza as saídas da fase anterior para determinar quais agentes o sistema irá conter e como eles irão interagir. Foca na identificação dos tipos de agentes, nas suas interações e na arquitetura do sistema;
- **Projeto Detalhado**, busca-se olhar internamente para cada agente e para como ele vai conseguir desempenhar as suas tarefas no sistema global. Envolve o refinamento dos agentes em relação à suas capacidades e especificando os processos do sistema.

Sistemas de agente são tipicamente situados em um ambiente alterável e dinâmico, o qual pode não ser totalmente controlado por eles. Uma das condições precípuas para a especificação do sistema é o entendimento de como ele vai interagir com o ambiente. As definições do Prometheus seguem os conceitos de percepções, para as informações que vêm do ambiente, e ações para os mecanismos que afetam o ambiente (Padgham e Winikoff, 2005). A primeira fase, de *especificação do sistema*, envolve:

1. Determinar o ambiente do sistema;
2. Determinar os objetivos e funcionalidades do sistema - quais são as metas e quais são as funcionalidades para atingir essas metas;
3. Definir a utilização de dados externos; e
4. Mapear as especificações por meio de casos de uso.

A maior decisão a ser tomada durante o projeto arquitetural é determinar quais agentes devem existir. Os projetistas atribuem funcionalidades aos agentes pela análise dos artefatos produzidos na fase anterior. O *Projeto de Arquitetura* envolve três atividades:

1. Definir o tipo dos agentes;
2. Projetar a estrutura global do sistema;
3. Definir as interações entre os agentes.

Os tipos de agentes são derivados do agrupamento das funcionalidades. Cada tipo identificado é especificado utilizando um descritor de agentes, que descreve o ciclo de vida desse tipo de agente (como e quando é inicializado e destruído), suas funcionalidades, os dados que utiliza e produz, seus objetivos, os eventos que deve responder, suas ações e os outros agentes que interagem com ele.

A estrutura do sistema é capturada em um diagrama da visão global do sistema, considerado o mais importante artefato de projeto da metodologia. O diagrama provê aos projetistas e implementadores uma visão geral de como o sistema irá funcionar, em sua totalidade; mostra os tipos de agentes, as relações de comunicação e dados entre eles; apresenta as fronteiras do sistema e do ambiente. Enquanto o diagrama global do sistema mostra a visão estática do SMA, os protocolos de interação capturam o comportamento dinâmico do sistema, definindo as sequências válidas de mensagens entre os agentes (Dam e Winikoff, 2003).

A última fase, de *detalhamento de projeto*, cumpre as seguintes atividades:

1. Definir as capacidades de cada tipo de agente;
2. Definir os eventos internos; e
3. Detalhar a estrutura de dados para cada tipo de agente identificado na fase anterior.

Inicialmente, as capacidades de cada agente são retratadas em um descritor que contém informações sobre como quais eventos são gerados e recebidos pelo agente, quais são as trocas de dados, e objetivos individuais. Esse detalhamento gera diagramas de visão geral dos agentes, apresentando as capacidades de auto-nível, o fluxo de tarefas entre essas capacidades e os dados internos dos agentes (Padgham e Winikoff, 2005).

Prometheus provê uma rica coleção de recomendações para cada um dos estágios, e guias para cada um dos passos. Também oferece ferramentas de suporte para o projeto dos diagramas, embora essas não sejam obrigatórias para a aplicação da metodologia. A ferramenta *Prometheus Design Tool* (PDT) (Lin Padgham e Winikoff, 2008) é livre e gratuita e foi desenvolvida pelos criadores da metodologia para permitir aos usuários criar e modificar projetos baseados nessa metodologia.

3.3 Padrões e Ferramentas

Linguagens de programação, plataformas e ferramentas de desenvolvimento são componentes importantes que podem afetar a difusão e o uso de tecnologias baseadas em agentes para diferentes domínios da aplicação. Segundo Bellifemine et al. (2007), o sucesso de sistemas multiagente é amplamente dependente da disponibilidade de tecnologias apropriadas que permitem a implementação relativamente direta de conceitos técnicos e do domínio da aplicação, e formam a base do SMA.

SMA pode ser construídos com qualquer linguagem de programação, sendo mais comum a utilização de linguagens orientadas a objetos, uma vez que os conceitos de agentes e objetos guardam algumas similaridades. Minimamente a linguagem deve incluir alguma estrutura correspondente a agentes. Linguagens específicas para agentes de *software* fornecem suporte adicional à atributos como crenças, objetivos, planos, papéis e normas.

O desenvolvimento de SMA pode ser facilitado por *frameworks* de desenvolvimento específicos, com funcionalidades não disponíveis nas plataformas de desenvolvimento tradicionais. Devem, também, dispor de meios de implementar SMA em diferentes tipos de *hardware* e sistemas operacionais, usualmente provendo uma *middleware* para dar suporte à execução e operações essenciais. Assim, esses *frameworks* oferecem funcionalidades como mecanismos de gerência, coordenação e comunicação, o que permite que os desenvolvedores possam dedicar mais tempo à modelagem dos agentes e ao projeto do sistema.

Algumas dessas plataformas também buscam dar suporte a interoperabilidade entre diferentes SMAs ao fornecer funcionalidades compatíveis com as especificações FIPA. Uma visão geral dessas especificações FIPA e de uma plataforma FIPA-compatível para o desenvolvimento de SMA será apresentada nas seções seguintes.

3.3.1 FIPA

A *Foundation for Intelligent Physical Agents* - FIPA foi estabelecida em 1996 como uma associação internacional, sem fins lucrativos, para desenvolver uma coleção de padrões re-

Tabela 3.1: Parâmetros das mensagens ACL (FIPA, 2003).

Parâmetros	Descrição
Performative	Tipo de ato comunicativo da mensagem
sender	Identifica o emissor da mensagem
receiver	Identifica os destinatários da mensagem
reply-to	Qual o agente para direcionar mensagens subsequentes em um segmento de conversação
content	Conteúdo da mensagem
language	Linguagem no qual o parâmetro conteúdo é expressado
encoding	Codificação específica do conteúdo da mensagem
ontology	Referência à ontologia para dar sentido aos símbolos do conteúdo da mensagem
protocol	Protocolo de interação usado para estrutura uma conversação
conversation-id	identificador único para uma conversação
reply-with	Expressão a ser usada por um agente que responde a mensagem para identificá-la
in-reply-to	Referência a uma ação anterior onde a mensagem é uma resposta
reply-by	Tempo/data que indicam quando uma resposta deve ser recebida

lacionados a tecnologia de agentes de *software*. A FIPA é uma organização pertencente ao *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), que tem por objetivo a produção de especificações de padrões de *software* para agentes heterogêneos e sistemas baseados em agentes. A principal missão da FIPA é a promoção e aprimoramento contínuo de tecnologias e especificações que facilitem e promovam a interligação de *software* baseados em agentes inteligentes nos setores industrial e comercial, visando à interoperabilidade entre sistemas autônomos. Para tanto, possuem normas que especificam protocolos, formato e linguagens para a comunicação e interação entre agentes, ontologias para a gerência do sistema, dentre outros elementos.

O conceito central da FIPA revolve em torno da comunicação dos agentes. Um dos padrões desenvolvidos pela FIPA é a FIPA ACL, conforme comentado na Seção 3.2.2. A mensagem FIPA ACL pode ser vista como um envelope de transporte que contém um conjunto de parâmetros Figura 3.5. Os parâmetros que são necessários para uma comunicação eficiente entre os agentes, variam conforme a situação. Entretanto, o único obrigatório é a performativa, mas é esperado que a maioria das mensagens também contenha um emissor, receptor e conteúdo. Os parâmetros das mensagens ACL são mostrados na Tabela 3.1.

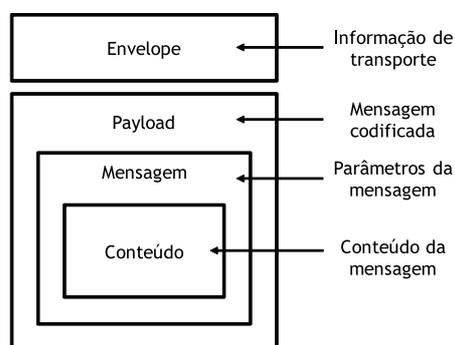


Figura 3.5: Estrutura da Mensagem FIPA (adaptado de FIPA (2003)).

Conforme a conceituação proposta pela FIPA, um agente é uma entidade de *software* que encapsula seu próprio estado, comportamento, processo de controle de execução e

possui a habilidade de interagir e se comunicar com outras entidades. Os agentes podem ser móveis, ou seja, podem migrar de uma plataforma para outra mantendo intacto o estado da sua informação.

Além da comunicação, o segundo conceito fundamental do SMA, especificado pela FIPA é o gerenciamento dos agentes, uma estrutura normativa na qual agentes compatíveis podem existir, operar e serem gerenciados. Para isso, estabelece um modelo lógico de referência para a criação, registro, localização, comunicação, migração e operação dos agentes. O modelo de referência para o gerenciamento de agentes consiste nos componentes descritos na Figura 3.6. O modelo de referência é composto pelos seguintes componentes, conforme FIPA (2002):

- Plataforma de Agente (*Agent Platform* - AP) - Provê a infraestrutura física em que os agentes são desenvolvidos. Inclui o *hardware*, sistema operacional, componentes de gerenciamento de agentes FIPA e agentes. O mecanismo interno da AP é inerente ao desenvolvedor do SMA e não há uma padronização FIPA. A FIPA só determina como é feita a comunicação entre agentes nativos da AP e não nativos;
- Agente - Um agente é um processo computacional que habita uma AP e tipicamente oferece um ou mais serviços computacionais que podem ser publicados como uma descrição de serviço. O projeto desses serviços, ou capacidades, não é matéria que concerne à FIPA, que somente arbitra sobre a estrutura e a codificação das mensagens utilizadas para a troca de informações entre os agentes. Cada agente deve ter pelo menos um proprietário e possuir um identificador único (*Agent Identifier* - AID);
- Facilitador de Diretórios (*Directory Facilitator* - DF) - Componente opcional de uma AP, mantém uma lista de agentes completa e apurada de serviços oferecidos no sistema por outros agentes (páginas amarelas). Os agentes podem registrar seus serviços com o DF ou requisitar ao DF que ele encontre serviços oferecidos pelos outros agentes. Múltiplos DFs podem existir dentro de uma mesma plataforma. Qualquer agente que deseja publicizar seus serviços para outros agentes deve procurar o DF apropriado e requisitar o registro;
- Sistema de Gerenciamento de Agentes (*Agent Management System* - AMS) - Componente obrigatório da plataforma de agentes. Responsável pelo gerenciamento da operação de uma AP, como a criação e deleção de agentes, e o acompanhamento das migrações de agentes da AP. Só pode existir um AMS em uma única plataforma de agentes. Cada agente deve registrar-se com o AMS de forma a receber uma AID válida. O AMS apresenta um diretório de AIDs que contém endereços de transporte para agentes registrados na plataforma. O AMS permite a um agente encontrar agentes capazes de prover um determinado serviço que necessita (páginas brancas);
- Sistema de Transporte de Mensagens (MTS): É o método padrão de comunicação entre agentes de diferentes plataformas. Todos os agentes FIPA têm acesso a, no mínimo, um MTS e somente mensagens endereçadas a agentes podem ser enviadas através do MTS. FIPA disponibiliza uma variedade de Protocolos de Transporte de mensagens (MTP) (Message Transport Protocols) para possibilitar que o MTS se comunique utilizando vários protocolos. O MTS é disponibilizado pelo Canal de Comunicação de Agentes (*Agent Communication Channel* - ACC);

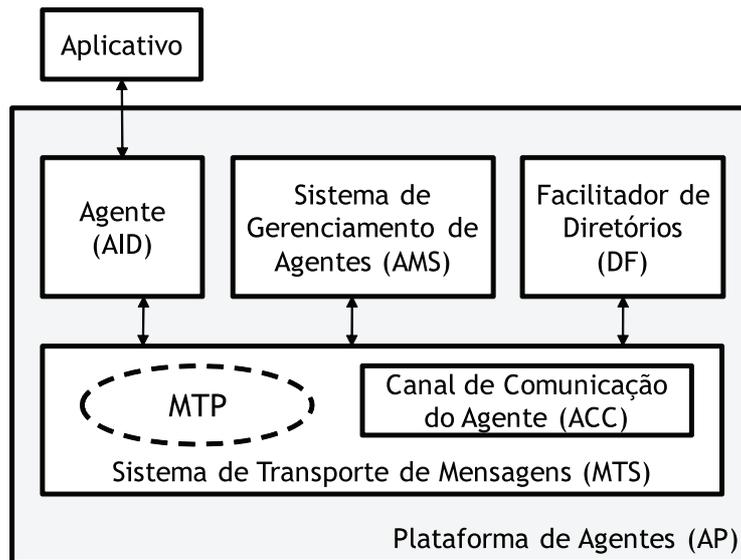


Figura 3.6: Modelo de Referência FIPA, da plataforma de agentes.

- **Aplicativo:** Descreve todos os conjuntos de rotinas executáveis que não sejam agentes e que possam ser acessíveis por meio dele.

Neste trabalho, procurou-se utilizar uma plataforma de desenvolvimento de SMA que fosse aderente aos padrões FIPA. A Seção 3.3.2 seguinte apresenta o *framework* escolhido que se adequa aos padrões citados e às necessidades do projeto.

3.3.2 Plataforma JADE

O *Java Agent Development Framework* (JADE), desenvolvido pelo TILab (*Telecom Italia Lab*), oferece um *framework* para o desenvolvimento de aplicações multiagente. JADE é uma plataforma de *software* totalmente implementada na linguagem Java. Permite a implementação de SMA por uma *middleware* independente da aplicação específica e que simplifica a realização de aplicações distribuídas que exploram a abstração de agentes de *software*. Cumpre as especificações FIPA e provê um conjunto de ferramentas gráficas que suportam as fases de depuração e implantação (Wooldridge, 2009).

Segundo Bellifemine et al. (2007), o objetivo da plataforma é simplificar o desenvolvimento de SMA, garantindo a conformidade com os padrões por meio de um conjunto de serviços e agentes que seguem as especificações da FIPA. Em alguns aspectos, JADE estende o modelo FIPA. Entretanto, em todos os aspectos relacionados à interoperabilidade, o propósito primordial da FIPA, JADE é compatível.

JADE possui um *website*¹, onde estão disponíveis o *software*, a documentação, códigos de exemplo e variadas informações sobre o uso da plataforma. A plataforma é distribuída gratuitamente sob a licença LGPL (*GNU Lesser Public License*) e encontra-se na versão 4.1 (13 de julho de 2011), embora a versão utilizada para a confecção desse trabalho tenha sido a 4.0.1.

A plataforma está fundamentada sob os seguintes princípios:

¹<http://jade.tilab.com>

- Interoperabilidade - conformidade com a especificação FIPA, o que significa que os agentes construídos sob o JADE podem interoperar com agentes desenvolvidos sob outros *frameworks* de desenvolvimento também compatíveis;
- Uniformidade - JADE é implementado na linguagem de ampla utilização Java e provê um conjunto homogêneo de APIs (*Application Programming Interface*), independentes da rede e da versão java utilizada;
- *Pay-as-you-go* - os desenvolvedores não precisam fazer uso de todos os recursos fornecidos pelo *framework*. Os recursos que não estão sendo utilizados não sobrecarregam o desempenho da máquina.

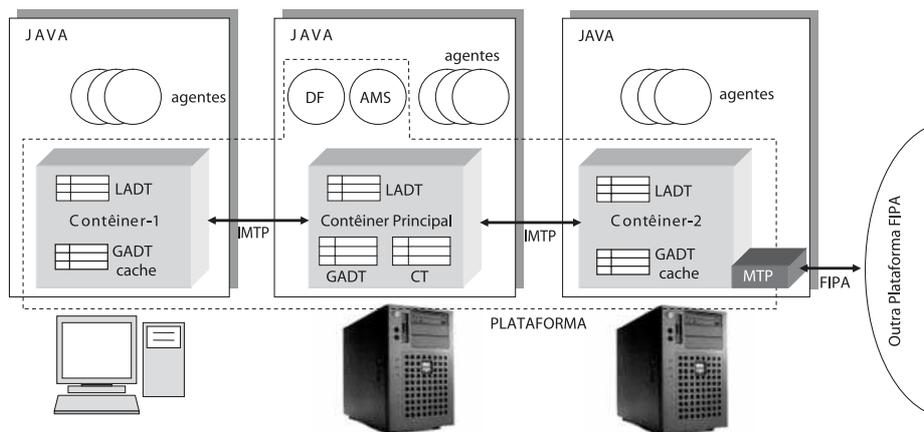


Figura 3.7: Principais elementos arquiteturais JADE (adaptado de ?).

A plataforma de agentes pode ser distribuída entre máquinas, não sendo necessário nem o mesmo sistema operacional, e a configuração pode ser controlada por uma interface remota. A configuração também pode ser alterada em tempo de execução, movimentando os agentes de uma máquina para outra, quando necessário. A Figura 3.7 mostra os principais elementos arquiteturais da plataforma JADE. É composta de contêineres de agentes que podem ser distribuídos pela rede. Agentes vivem em contêineres que são processos Java que proveem a execução ao JADE e todos os serviços necessários para hospedar e executar agentes. Existe um contêiner principal (*main container*) que representa o lançamento inicial da plataforma: é o primeiro contêiner a ser lançado e todos os outros contêineres precisam se registrar no contêiner principal. O diagrama UML (Figura 3.8) esquematiza as relações entre os principais elementos arquiteturais do JADE.

Quando o contêiner principal é lançado, dois agentes especiais são automaticamente instanciados e inicializados pelo JADE, cujos papéis são definidos pelo padrão FIPA: o AMS e o DF. No início da execução, o contêiner principal tem algumas responsabilidades além de hospedar o AMS e o DF: (i) Gerenciar a tabela de contêineres (*Container Table - CT*), que é o registro das referências de todos os contêineres que compõem a plataforma; (ii) Gerenciar a tabela global de descritor de agentes (*Global Agent Descriptor Table - GADT*), que é o registro de todos os agentes presentes na plataforma, incluindo o seu estado atual e localização.

Outra característica é que a plataforma de agentes pode ser distribuída por vários *hosts*, cada um deles executando apenas uma Máquina Virtual Java (JVM - *Java Vir-*

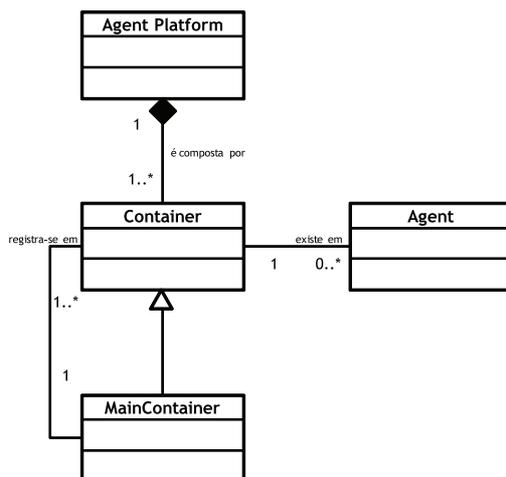


Figura 3.8: Diagrama dos elementos da arquitetura JADE (adaptado de ?).

tual Machine. Os agentes são implementados como *threads* Java e inseridos dentro de repositórios de agentes (contêiner), que disponibilizam todo o suporte para a execução do agente e representam o ambiente de execução das aplicações de agentes. Ao conjunto de contêineres dá-se o nome de plataforma e esta provê uma camada homogênea na qual fica transparente aos agentes e desenvolvedores a complexidade existente entre a plataforma e os recursos. É possível existir mais de um contêiner na mesma plataforma, sendo uma JVM para cada contêiner. Diferentes agentes podem existir dentro do mesmo contêiner, cada qual com sua *thread* de execução. A JVM é responsável por escalonar as *threads*. A comunicação entre JVM's é feita através do método *Java Remote Method Invocation* (RMI).

Pode-se notar que o contêiner principal, por ser único, torna-se um ponto de falha geral da plataforma, ou seja, qualquer falha no seu funcionamento inutiliza a plataforma. Como mecanismo de tolerância a falhas, JADE disponibiliza um serviço de replicação do contêiner principal.

Do ponto de vista da implementação, um agente em JADE é uma instância da classe **Agent**, contida no pacote `jade.core`. Esta classe facilita o desenvolvimento de agentes porque provê todas as características necessárias para realizar as interações básicas com a plataforma, tais como métodos para registro, configuração ou gerenciamento remoto do agente. Também fornece o conjunto básico de métodos que podem ser chamados para implementar o comportamento (*behaviour*) do agente.

A utilização do JADE neste trabalho justifica-se por ser uma ferramenta de *software* livre, uma plataforma compatível com a FIPA, por apresentar uma *middleware* que fornece todos os serviços essenciais de gerenciamento e comunicação, pela vasta documentação correspondente e por ser de ampla utilização, contando com comunidade de desenvolvedores e ricas listas de discussão.

3.4 Aplicações de SMA

SMA é utilizado em uma crescente e ampla variedade de aplicações, que vão desde sistemas comparativamente pequenos e simples de assistência pessoal até sistemas complexos,

abertos de missão crítica para aplicações industriais (Jennings e Wooldridge, 1998).

Aplicações industriais são muito importantes para SMA porque foram as primeiras técnicas experimentadas e que apresentaram o potencial do paradigma. Exemplos de aplicação de SMA nesse domínio incluem controle de processos, diagnósticos de sistemas, manufaturas, logística de transporte e gerenciamento de rede (Bellifemine et al., 2007).

Um dos mais importantes campos de atuação de SMA é a gestão da informação (Decker e Sycara, 1997). Em particular, a Internet tem se mostrado como um domínio ideal para SMA, devido à sua natureza intrinsecamente distribuída e ao volume de informação disponível. A Internet também impulsionou o uso de tecnologias de agentes nos campos de *e-commerce* e *Business Process Management* (BPM). Nesse cenário, SMA tem se mostrado adequado tanto para a modelagem e projeto de sistemas de gerenciamento de processos e componentes essenciais, como para a automação de etapas desses processos (Jennings e Wooldridge, 1998).

Controle de tráfego e transporte, sistemas de telecomunicação e muitos sistemas multi-robóticos também utilizam-se de SMA e técnicas de planejamento distribuídos para a coordenação das diferentes entidades envolvidas nos respectivos domínios. Aplicações de SMA voltadas para áreas fim, como a saúde, bioinformática e ecologia tem sido comprovadas como úteis para o suporte à decisão, acesso e gerenciamento das informações (Bellifemine et al., 2007).

3.4.1 SMA e Ecologia

A abordagem de SMA tem contribuído nas observações sobre a conectividade dos elementos ecossistêmicos, bem como em suas interações e organização em diferentes escalas. Dessa maneira, a abordagem pode ser utilizada para explorar conceitos e relações complexas, presentes nos problemas ambientais e de distribuição de recursos. Sob essa perspectiva, o uso da terra poderia ser representado por grupos de agentes procurando ocupar áreas para alcançar os seus objetivos de produção.

O comportamento e as interações são fatores chave para o entendimento e a modelagem da organização dos ecossistemas. Bousquet e Le Page (2004) apresentam muitos avanços alcançados por cientistas da computação que trabalham com referências ecológicas. A revisão da literatura mostra que, na maioria dos casos, o método de simulação é o utilizado. As simulações multiagente têm por objetivo estudar as interações dos agentes autônomos e sua organização. Um dos usos é produzir um sistema que se comporte como a realidade, que seja sempre atual, e que a meta de utilização do simulador seja testar cenários alternativos. Ferramentas para simulação são basicamente modelos de estrutura fixa, equipados com uma interface de usuário que permite configurar parâmetros e analisar as simulações (Ginot et al., 2002).

Pesquisadores nas Ciências Ecológicas e Sociais podem usar simulações multiagente para melhor modelar as tomadas de decisão, testar processos de aprendizagem, estudar com mais profundidade e efetividade as diferentes formas de organização e as interações em diferentes níveis. Para os Cientistas da Computação, é possível explorar os conceitos das ciências naturais e sociais no comportamento dos indivíduos, nos sistemas de interação entre os agentes e seu ambiente e nas relações entre organizações ou instituições e propriedades de estabilidade, resiliência e hierarquia (Bousquet e Le Page, 2004).

O foco na organização das múltiplas interações entre os agentes tem motivado várias possibilidades de uso de SMA para reprodução de níveis de relações interdisciplinares e atraindo cada vez mais pesquisas. Há, principalmente, a reformulação de questões que envolvem interações entre dinâmicas sociais de acesso à natureza e utilização dos recursos naturais ([Barreteau et al., 2007](#); [Becu et al., 2003](#); [Verburg et al., 2004](#)).

O SMA é aquele que modela todo o comportamento dos indivíduos e as relações entre eles. Entretanto, ainda há a carência pela definição dos dados de entrada que caracterizam o meio ambiente físico. O modo mais comum, a aquisição de dados por imagem, é discutida na Seção [2.4](#).

Capítulo 4

Trabalhos Correlatos

O desenvolvimento de ferramentas computacionais de simulação para a investigação de mudanças no ambiente, em especial na dinâmica do uso e cobertura da terra, tem sido abordado sob perspectivas distintas, em trabalhos nacionais e internacionais. As ferramentas diferem quanto à metodologia, técnica e quanto à complexidade permitida para a simulação de modelos. Para cada uma, é possível elencar vantagens e desvantagens, dependendo do objetivo da pesquisa.

Este capítulo fornece uma revisão de diferentes tipos de ferramentas, destacando abordagens distintas. As ferramentas escolhidas para a revisão foram definidas conforme os trabalhos mais citados na literatura, além de algumas ferramentas recentes, que apontam novas tendências e abordagens. Para todas as ferramentas investigadas, foram analisados trabalhos de modelos que as aplicam, de modo que fossem comparadas apenas aquelas *tried and true*.

4.1 Comparação entre as Ferramentas

O método utilizado para tabular e discutir as diferentes abordagens é o *framework* para a avaliação de modelos e ferramentas que envolvam interações humanas e ambientais, definido por [Agarwal et al. \(2001\)](#). A estrutura fornece parâmetros para a comparação da escala e complexidade permitidas às ferramentas, sempre fundamentados em três dimensões: espaço, tempo e tomada de decisão humana.

A análise da escala do modelo é relevante na construção de ferramentas pois os processos ecológicos e sociais acontecem em diferentes escalas. O principal interesse é investigar quais são as permissões conferidas ao usuário, quando da definição da resolução e extensão do modelo. Para essa investigação [Agarwal et al. \(2001\)](#) propõe parâmetros para as três dimensões, conforme sintetizado na Tabela 4.1.

A complexidade do modelo também é parametrizada. As ferramentas são avaliadas em sua complexidade temporal, espacial e de tomada de decisão. O *framework* define complexidade temporal como o horizonte em que as decisões podem ser feitas no tempo. As ferramentas, e respectivos modelos, podem permitir decisões em um curto período de tempo, ou seja, decisões que afetem os próximos momentos no tempo (baixa complexidade temporal), ou decisões à longo prazo (alta complexidade temporal). A complexidade espacial, segundo o trabalho, refere-se ao nível em que o modelo é espacialmente explícito: se ele é representativo ou interativo. Um modelo representativo retrata o espaço, entre-

Tabela 4.1: Resolução e extensão nas três dimensões de espaço, tempo e tomada de decisão humana (adaptado de Agarwal et al. (2001)).

	Espaço	Tempo	Tomada de decisão humana
Resolução ou equivalente	<i>Resolução</i> : menor unidade geográfica de análise da mudança no modelo.	<i>Time step</i> : menor unidade temporal de análise da mudança no modelo.	<i>Agente</i> : representa o ator humano ou atores que tomam as decisões. Menor unidade decisória.
Extensão ou equivalente	<i>Extensão</i> : descreve a área geográfica total em que um modelo é aplicado.	<i>Duração</i> : período de tempo para o qual o modelo é aplicado.	<i>Domínio</i> : refere-se à organização, instituição ou estrutura social incorporada ao modelo.

Tabela 4.2: Seis Níveis da complexidade das decisões humanas (adaptado de Agarwal et al. (2001)).

Nível	Descrição
1	Sem tomada de decisão humana - apenas as variáveis biofísicas no modelo.
2	Tomada de decisão humana é determinadamente relacionada ao tamanho da população, mudanças na população ou densidade populacional.
3	Tomada de decisão humana tida como uma função de probabilidade dependendo de variáveis socioeconômicas ou biofísicas além das variáveis populacionais, sem feedback do ambiente à função que determina a decisão.
4	Tomada de decisão humana tida como uma função de probabilidade dependendo de variáveis socioeconômicas ou biofísicas além das variáveis populacionais, com feedback do ambiente à função que determina a decisão.
5	Um tipo de agente, cujas decisões são modeladas prioritariamente em relação a escolhas feitas com base em variáveis que afetam outros processos e resultados.
6	Múltiplos tipos de agentes, cujas decisões são modeladas prioritariamente em relação a escolhas feitas com base em variáveis que afetam outros processos e resultados. O modelo pode também ser capaz de tomar decisões por domínios, a medida que os <i>time steps</i> são processados, ou acerca de interações entre agentes tomadores de decisão.

tanto, não consegue modelar relações e interações topológicas, como por exemplo, entre células ou polígonos. Nesses casos, o valor de cada célula pode mudar ou permanecer o mesmo, mas a lógica da mudança não depende das células vizinhas. O modelo interativo permite esses relacionamentos.

A complexidade da tomada de decisão humana foi indexada em 6 grandes classes, de modo a captar as escolhas de como as decisões são tomadas. Essa classificação, apresentada pelo *framework*, é transcrita na Tabela 4.2.

Conforme a complexidade das três dimensões (espaço, tempo e tomada de decisão humana), as ferramentas e modelos variam nesse espectro. Segundo Agarwal et al. (2001), a ferramenta que permitir a mais alta complexidade em cada uma das dimensões, é aquela que melhor consegue reproduzir a dinâmica das relações homem-ambiente. A Figura 4.1 sintetiza a afirmação da proposta.

Quanto à técnica, existem plataformas que usam exclusivamente SMA, outras que se baseiam em processos estatísticos, estocásticos ou de autômato celular, e ainda um grupo que combina características das duas técnicas, podendo ser classificadas como ferramentas híbridas. Todo esse arcabouço foi aplicado para um conjunto de ferramentas, com o objetivo de identificar as características mais comuns de projeto, inovações e suscetibilidades, de modo a fundamentar a proposição de uma nova ferramenta. Uma breve descrição das ferramentas revisadas, seguida pelos quadros comparativos entre elas, são descritos

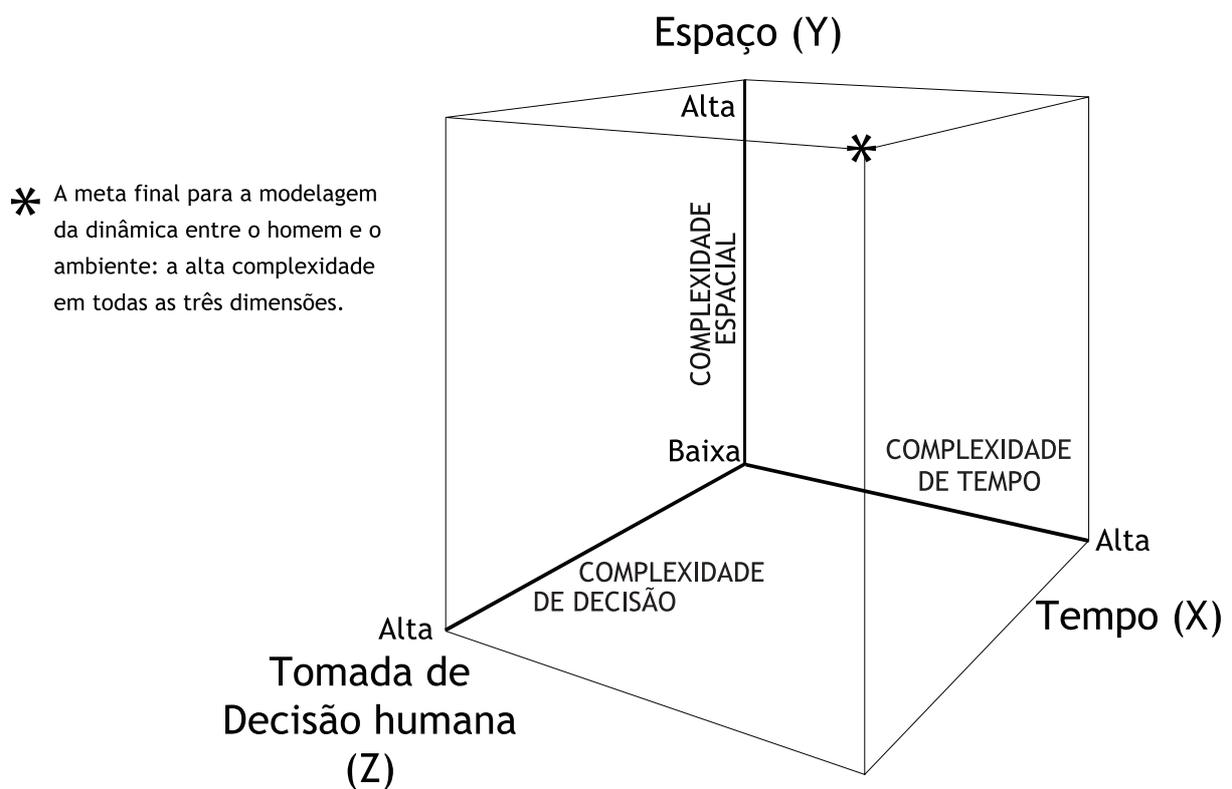
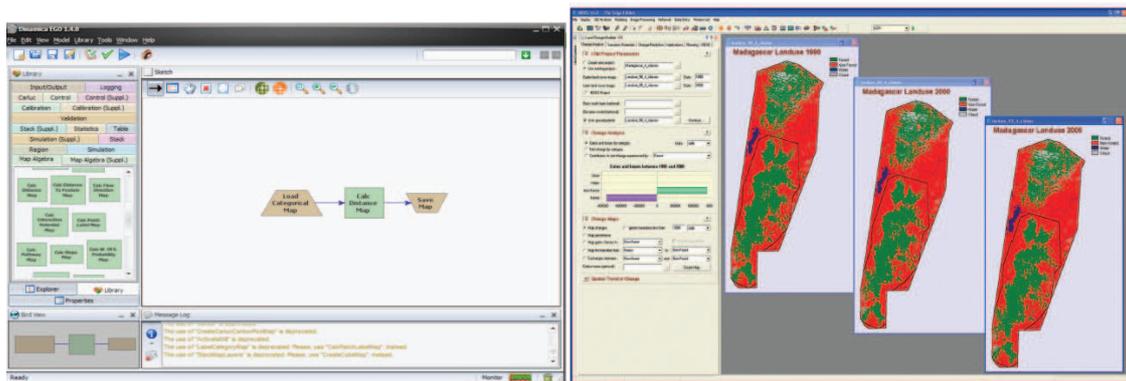
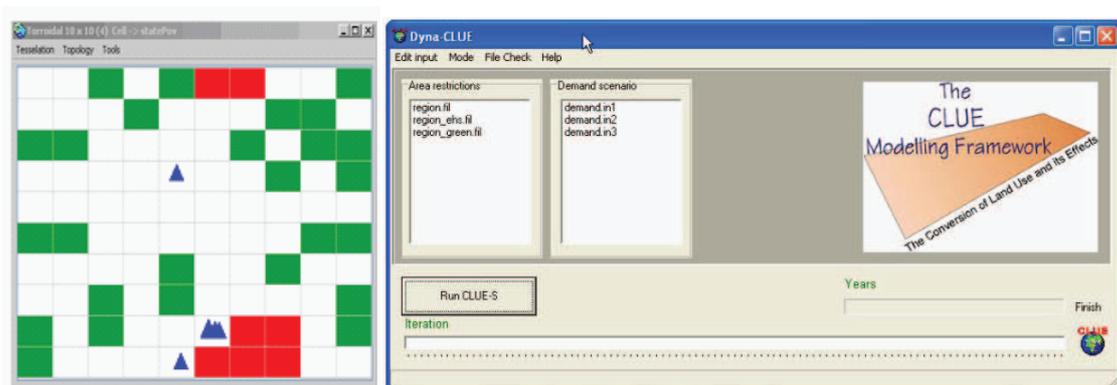


Figura 4.1: Estrutura tridimensional para avaliação de ferramentas e modelos de uso da terra (adaptado de [Agarwal et al. \(2001\)](#)).



(a) Dinamica EGO

(b) Idrisi



(c) CORMAS

(d) CLUE

Figura 4.2: Interfaces das ferramentas de simulação.

a seguir. A ilustração da interface de algumas dessas ferramentas pode ser conferida na Figura 4.2.

O trabalho de pesquisa desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) destaca-se com a ferramenta de domínio público Dinamica EGO¹ (Soares-Filho et al., 2002), cuja interface pode ser conferida na Figura 4.2(a). O Dinamica EGO (EGO - *Environment for Geoprocessing Objects*) é um simulador que utiliza um modelo baseado em cálculo estocástico e formalismo de autômato celular, para replicação dos padrões espaciais de mudanças da dinâmica de paisagens. O Dinâmica EGO possibilita a concepção e a aplicação de modelos de simulação para a gestão ambiental sem fazer uso de técnicas de IA ou SMA. Por ser uma ferramenta de caráter genérico, fácil de ser adaptada, tem sido aplicada para modelar vários fenômenos, como desflorestamento, uso da terra e dinâmica urbana (Almeida et al., 2003; Soares-Filho et al., 2003).

A ferramenta brasileira consiste em uma plataforma amigável ao usuário, escrita em C++ e Java, que implementa algoritmos comuns de GIS, além de uma série de algoritmos especialmente concebidos para simulações espaciais, incluindo funções de transição e métodos de calibração e validação. Conforme a experiência do usuário, é possível desenvolver desde simples modelos estáticos espaciais até modelos dinâmicos complexos. O Dinâmica-EGO tem a vantagem de ser bem documentado, contar com tutoriais e conjun-

¹<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>

tos de dados que orientam o usuário ao uso da ferramenta, além de possuir fóruns ativos para a resolução de dúvidas.

A Figura 4.2(b) ilustra a ferramenta IDRISI², produzida pela *Clark Labs*, a qual utiliza modelo de simulação espacial baseado em autômato celular e cálculo estocástico. Estes modelos têm se tornado populares, sendo incluídos em *softwares* comerciais de SIG, como o IDRISI, devido à sua facilidade de implementação, habilidade em mimetizar formas e capacidade de serem readaptados para produzir vários tipos de fenômenos espaciais (Eastman, 2001). Atualmente em sua versão 16 (IDRISI Taiga), a ferramenta dispõe de mais de 300 módulos de análise e visualização da informação espacial. Para a simulação da dinâmica de uso da terra é possível destacar o módulo LCM - *Land Change Modeler*, que aplica técnicas estatísticas para avaliar a mudança no espaço, tendo por base a imagem em dois tempos distintos.

O LCM, além de integrado dentro do sistema IDRISI e disponível como uma extensão do ArcGIS da ESRI³, fornece ferramentas para a avaliação e projeção de mudanças na cobertura da terra, e das implicações para o *habitat* das espécies e da biodiversidade. Embora a ferramenta não utilize técnicas de SMA, é possível investigar tendências históricas, identificar fatores que podem influenciar nas mudanças e até modelar cenários futuros. As linhas gerais da ferramenta são descritas em informes técnicos e existem tutoriais para guiar os usuários iniciantes. Embora seja um *software* proprietário, é possível testá-lo por um período de 30 dias.

O CORMAS (*Common-Pool Resources and Multi-agent Systems*), desenvolvido pela *French Agricultural Research Centre for International Development* (CIRAD), é uma ferramenta de simulação que utiliza abordagem SMA, construída na plataforma *Visual Works* com a linguagem *Smaltalk* (Bousquet et al., 1998; Ginot et al., 2002; Page et al., 2000). Conforme apresentado na Figura 4.2(c), o CORMAS foi projetado para ser um ambiente de fácil desenvolvimento, dedicado à modelagem das interações das sociedades humanas com os recursos renováveis. A ferramenta fornece uma estrutura multiagente que pode ser usada para simular as interações entre um grupo de agentes e um ambiente compartilhado, por meio de três categorias de agentes programáveis:

- i espaciais;
- ii espaciais-comunicantes;
- iii comunicantes.

Os agentes espaciais são unidades do espaço (células) configuradas por meio de variáveis e, juntas, elas representam o espaço em análise. Os agentes espaciais-comunicantes são entidades dotadas de mobilidade, e que, portanto, movimentam-se sobre o espaço de células. Finalmente, os agentes comunicantes representam as próprias mensagens de comunicação dos outros agentes. O CORMAS também trabalha com intervalos de tempos pré-definidos, os *steps*. A cada *step*, os agentes executam suas ações de forma síncrona e organizada, atualizando o estado do conjunto de agentes a cada passo.

Existem variados modelos ambientais desenvolvidos com a plataforma CORMAS⁴ (Becu et al., 2003; D'Aquino et al., 2003). Entretanto, é característica comum a ausência

²<http://www.idrisi.com.br/>

³<http://www.esri.com/software/arcgis/features.html>

⁴<http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>

Tabela 4.3: Características gerais e tecnologia das ferramentas

Ferramenta	Tipo de modelo	Tecnologia	Hierarquia
Dinâmica EGO	Modelos espaciais dinâmicos	Autômato Celular	<i>top-down</i>
IDRISI	Modelo espacial de Markov	Autômato Celular	<i>top-down</i>
CORMAS	Simulações Multiagentes	Sistema Multiagente	<i>bottom-up</i>
CLUE	Modelo de estado finito discreto	Matrizes de conversão	<i>top-down</i>

Tabela 4.4: Características espaciais das ferramentas

Ferramenta	Complexidade Espacial		Escala Espacial	
	Representação	Interação	Resolução	Extensão
	<i>Estática. Representa dados em um mapa e pode retratar variações</i>	<i>Dinâmica. Inclui efeito da variação de processos, e feedback da vizinhança</i>	<i>Raster ou vetor. A área da unidade básica de análise.</i>	<i>Localização e área total de cobertura</i>
Dinâmica EGO	Sim	Sim	<i>Raster</i> Matriz Quadrada	Dependente do modelo
IDRISI	Sim	Nao	<i>Raster</i>	Dependente do modelo
CORMAS	Sim	Sim	<i>Raster</i>	Dependente do modelo
CLUE	Sim	Nao	<i>Raster</i> Definida pelo usuário	Dependente do modelo

de investimento na racionalidade dos agentes na maioria dos modelos. Embora a racionalidade seja uma das características mais marcantes em um SMA, essa funcionalidade, quando existente, é tratada de maneira periférica.

A ferramenta CLUE - *The Conversion of Land Use and its Effects*⁵. é uma plataforma específica para as investigações de uso e cobertura da terra, por meio de um modelo discreto, cujas funções de mudança são baseadas em cálculos estatísticos (Veldkamp, 1996; Veldkamp e Fresco, 1996). As diferentes versões do modelo CLUE (CLUE, CLUE-s, *Dyna* CLUE e *CLUE Scanner*) estão entre os modelos LUCC mais utilizados no globo. Aplicações vão desde pequenas regiões à continentes inteiros. Oferece uma ferramenta genérica, flexível, que permite ser aplicada em diversas escalas, e está disponível para *download* para fins educacionais, conforme observado na Figura 4.2(d).

O CLUE-S (*S-small regions*) possui uma limitação espacial, sendo adequado para aplicação em pequenas regiões (Verburg et al., 2002). Apesar de não utilizar técnicas de agentes, a ferramenta usa relações derivadas empiricamente, baseada nos padrões existentes de uso da terra, para a alocação da mudança. Permite também a competição entre os diferentes usos da terra e pode ser facilmente aplicada a um variado espectro de estudos do uso e da cobertura da terra.

As características gerais desse grupo de ferramentas podem ser conferidas no conjunto de tabelas a seguir. A caracterização da metodologia e seu propósito geral são apresentados na Tabela 4.3. As características espaciais de cada ferramenta são descritas na Tabela 4.4. Finalmente, a descrição em relação ao tempo e à tomada de decisão humana é sintetizada na Tabela 4.5.

⁵<http://www.ivm.vu.nl/>

Tabela 4.5: Características temporais e de decisão humana das ferramentas

Ferramenta	Escala temporal		Tomada de decisão humana
	<i>Time step</i> <i>Menor período de tempo</i>	Duração <i>time step x runs</i>	Complexidade <i>Classificada conforme os 6 níveis apresentados na Tabela 4.2</i>
Dinâmica EGO	Definido pelo usuário	Intervalo de tempo entre a imagem inicial e a final	Nível 2. Assumida como relacionada ao tamanho da população, densidade etc
IDRISI	Iterações definidas pelo usuário	Determinada pelo número de iterações	Nível 1. Somente variáveis biofísicas no modelo
CORMAS	Definido pelo usuário	Definida conforme ciclo do modelo	Nível 5. Variável conforme o <i>Raster</i> comportamento dos agentes
CLUE	1 mês	Determinada pelo usuário	Nível 4. Função de probabilidade <i>Raster</i> que aplica variáveis socioeconômicas

Nota-se a variedade de implementações em várias características, como o tipo de modelo, tecnologia e tipo de tomada de decisão. Outras características, como a escala e resolução, são mais homogêneas. Pela análise das ferramentas, é possível observar algumas tendências na complexidade. As ferramentas usualmente trabalham com múltiplos passos de tempo, e com representação espacial baseada em modelos *raster*. Já é maior o número de ferramentas que permitem a interação dos elementos do espaço, principalmente dos elementos de vizinhança, em relação aos modelos que meramente representam cada célula sem considerar o contexto em que está inserida. Percebe-se o uso comum de imagens derivadas do sensoriamento remoto, sendo que a maior parte já trabalha com imagens classificadas e transformadas para o formato *raster*.

Nota-se que ainda são mais comuns os sistemas com abordagem estatística (Dinâmica Ego e IDRISI) do que as metodologias baseadas em agentes ou especialistas (CORMAS). Entretanto, as ferramentas que permitem incorporar maiores níveis de decisão humana são as que menos se baseiam em métodos estocásticos. Quanto à utilidade, as ferramentas são propostas prioritariamente para demonstrar padrões emergentes e, menos frequentemente, para fins preditivos.

Além dessas percepções gerais, a literatura apresenta revisões gerais sobre ferramentas de modelagem do uso da terra, tecendo críticas comuns a vários trabalhos (Matthews et al., 2007; McIntosh et al., 2007; Verburg et al., 2004). Um ponto presente em quase todas as pesquisas são os questionamentos em torno das *Escalas*. São raras as ferramentas que permitem a parametrização das escalas pelo usuário, bem como que permitem análises em múltiplas escalas simultaneamente, e que implementem mecanismos de *feedback* entre as escalas. Outra crítica comum diz respeito a como as ferramentas interagem no espaço. A maioria peca na representação e interação espacial ao considerar o espaço homogêneo (IDRISI), ao aplicar regras de transição universais (Dinâmica EGO, CLUE) ou ao permitir unicamente vizinhanças estacionárias (IDRISI, Dinâmica EGO, CLUE). Também é ressaltado pelos especialistas a carência de formalizações matemáticas, computacionais ou estatísticas que confirmam maior robustez aos resultados que a ferramenta apresenta.

Alguns apontamentos de ordem mais geral observam que é necessário conferir maior credibilidade às ferramentas e aos modelos, por meio de verificações e validações consistentes. É consenso também a ausência de interfaces leves e amigáveis ao usuário, além de ferramentas que consigam conversar com as inúmeras ferramentas de GIS e que possibilitem a visualização de imagens já existentes.

Especificamente para as ferramentas que utilizam a abordagem de SMA, as críticas residem, principalmente, no que tange à racionalidade dos agentes pois os trabalhos que apresentam essa racionalidade não costumam incluir autonomia nem proatividade em seus agentes. Alguns apontamentos observam que é necessário conferir maior credibilidade aos modelos, por meio de verificações e validações consistentes. As características técnicas de cada uma das ferramentas, bem como as críticas respectivas foram consideradas na proposta de ferramenta de simulação aqui apresentada. Com base nesses trabalhos correlatos, e no estudo da fundamentação teórica, chegou-se a uma proposta de ferramenta de SMA híbrida, a qual será descrita no Capítulo 5.

4.2 Aplicações de Ferramenta e Modelos

São inúmeros os trabalhos correlatos que podem ilustrar as aplicações das ferramentas revisadas no campo da modelagem de uso e cobertura da terra. Foram selecionados alguns poucos modelos, relevantes para a discussão em pauta, que evidenciam algumas possibilidades e características das ferramentas.

O modelo de [Bonnefoy et al. \(2000\)](#) foi desenvolvido na plataforma CORMAS e foca a ação de agentes exploradores de florestas e suas estratégias frente ao espaço e as relações sociais. Os autores exploram esse cenário de forma relativamente simples, de modo a demonstrarem que um SMA possui a capacidade de modelar uma região em toda a sua complexidade. O exemplo é desenvolvido para mostrar que essa ferramenta é capaz de espacializar e distribuir o comportamento de indivíduos, além de permitir que indivíduos integrem diferentes percepções do espaço, bem como admitam diferentes restrições, a eles impostas por uma comunidade. São estabelecidas as relações entre espaço, indivíduo e sociedade, de maneira a possibilitar o teste de teorias e hipóteses geográficas.

Outro trabalho com a ferramenta CORMAS descreve o modelo da dinâmica de uso da terra dos Pampas retrata as interações que afetam essa fitofisionomia vegetal, em área restrita na Argentina e Uruguai e ilustra as interações do uso da terra para agricultura (soja) e pecuária, assim como o aluguel e compra de terrenos ([Arbeletche et al., 2008](#)). O objetivo é formalizar o conhecimento sobre esses aspectos para compreender a relação entre os produtores tradicionais e o desenvolvimento nesta área. O mais interessante neste modelo é a possibilidade de tentar captar interações sociais sutis, como as tradições. Apesar da exploração da terra para o plantio de soja ser mais rentável, há uma propensão histórica (tradicional) para a pecuária. O trabalho associa uso da terra, mercado e cultura, utilizando-se de SMA para modelagem.

O trabalho de [Saqalli et al. \(2010\)](#) descreve o processo de desenvolvimento em ambientes rurais e com restrições econômicas e sociais. São cenários típicos de situações complexas, onde a sociedade e o ambiente estão interligados. O trabalho merece destaque uma vez que admite e trabalha com a incerteza/falta de informação. Muitas vezes, as áreas em estudo não contêm a quantidade necessária de dados e informações confiáveis que seriam desejadas. Os autores propõem um modelo baseado em agentes, utilizando a ferramenta CORMAS, para abordar questões econômicas e de produção, conforme regras e normas sociais. O objetivo é construir um modelo robusto que compense a falta de informação. O comportamento dos agentes sociais foi definido a partir de entrevistas, enquanto a descrição econômica e ambiental provém da literatura. Os resultados confirmam

que é possível construir agentes que levem em consideração tanto as gradações sociais, ambientais e econômicas, sendo sensíveis a essas alterações.

Outro trabalho importante, desenvolvido por [Maeda et al. \(2010\)](#), tem como foco as mudanças no uso e na cobertura da terra das Montanhas Taita, no Quênia, que também são consideradas como uma das mais importantes regiões para a conservação biológica em todo o mundo (*hotspot* de biodiversidade). Apenas 1% da cobertura original está preservada e instrumentos para auxiliar a tomada de decisão, segundo os autores, são imprescindíveis. De modo a criar políticas efetivas para a preservação dos recursos e da biodiversidade, é crucial entender as relações envolvidas na alteração da paisagem nas áreas mais degradadas. Essas são as premissas do modelo desenvolvido, que objetiva entender o papel dos atributos da paisagem e componentes de infraestrutura como forças motrizes da expansão da agricultura em Taita. A proposta não utiliza SMA, mas a conjugação de informações geoespaciais e sociais, empregando a ferramenta Dinamica-EGO para antever a expansão da agricultura e simular cenários futuros para a paisagem.

O grupo de pesquisa em Sistemas Computacionais para Gestão Ambiental da Universidade de Brasília (UnB)⁶, explorou o uso de SMA para apoio à decisão. Um modelo de simulação denominado *ReasonBalance*, baseado no CORMAS utilizou SMA para avaliar o comportamento de agentes exploradores de acordo com o plano de manejo na Região de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Uacará, Amazônia. As simulações visavam ao entendimento das alterações no uso da terra a partir do comportamento de agricultores que agiam conforme os cenários degradativo ou conservativo ([Marinelli et al., 2010](#)).

Como evolução dos trabalhos do grupo de pesquisa citado, surgiu a proposta de uma ferramenta que não apresentasse as restrições da plataforma CORMAS, utilizada anteriormente no modelo do *ReasonBalance*, claramente fazendo proveito da experiência adquirida no estudo e mapeamento de ferramentas semelhantes. Como resultado dessa pesquisa de contexto e da experiência do grupo, propôs-se uma arquitetura e implementou-se um protótipo de ferramenta de simulação baseado na abordagem de SMA para Gestão Ambiental, que será apresentada no Capítulo 5.

⁶Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil, CNPq, Grupo de Pesquisa em Sistemas Computacionais para Tratamento de Informação e Conhecimento, Linha de Pesquisa - Sistemas Computacionais para Gestão Ambiental, <http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhelinha.jsp?grupo=024010360AHR2C&seqlinha=4>

Capítulo 5

Proposta do Trabalho

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação, baseada na abordagem de SMA, para analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra, utilizando como estudo de caso o bioma Cerrado. O objetivo principal da ferramenta é contribuir para a exploração de cenários alternativos como auxílio às pesquisas ecológicas e à tomada de decisão dos gestores ambientais.

A finalidade da abordagem de SMA é flexibilizar a interação dos agentes para integrar níveis de complexidade das decisões tipicamente humanas aos modelos espacialmente explícitos, em um contexto de uso e cobertura da terra. Além disso, a utilização de agentes é bastante apropriada na resolução de uma tarefa que é processada em níveis, com ações executadas paralelamente ou sequencialmente.

A proposta de ferramenta surgiu a partir do conhecimento adquirido pelo grupo de pesquisa na produção e execução do Projeto *ReasonBalance* (ver Seção 4.2). Nessa nova iniciativa, o grupo primou por aprofundar os conhecimentos acerca de ferramentas de simulação, ampliar as possibilidades de funcionalidades disponíveis no projeto anterior, bem como aplicar a ferramenta em um estudo de caso de maior complexidade.

Em linhas gerais, a ferramenta de simulação proposta busca fornecer ao usuário a possibilidade de testar hipóteses e de refletir acerca do domínio do modelo utilizado. Em um contexto de tomada de decisão, a ferramenta pode apoiar o processo decisório a partir do momento que o tomador de decisão envolve-se na sua definição, possibilitando a sintetização de informações para gestão. É importante esclarecer que não é objetivo do projeto prover resultados precisos sobre o comportamento de sistemas complexos e decisões futuras mas sim auxiliar em um processo de aprendizagem e conscientização, a partir da compreensão das variadas causas e consequências relacionadas aos processos de uso da terra. Uma visão geral da finalidade da proposta em estudo pode ser conferida na Figura 5.1.

Dada uma configuração espacial inicial, a ferramenta deve ser capaz de simular a dinâmica de uso e cobertura da terra, com base no comportamento de agentes que podem colaborar ou competir entre si. A alteração de parâmetros configura cenários alternativos que poderão avaliar a relevância das variáveis, explorar os limites da sustentabilidade dos padrões atuais frente à legislação ambiental existente, ou testar novos conjuntos de parâmetros para simular a dinâmica do uso da terra.

A credibilidade da simulação é consequência da apresentação detalhada do modelo e das funcionalidades da ferramenta, com base nas metodologias de documentação mais

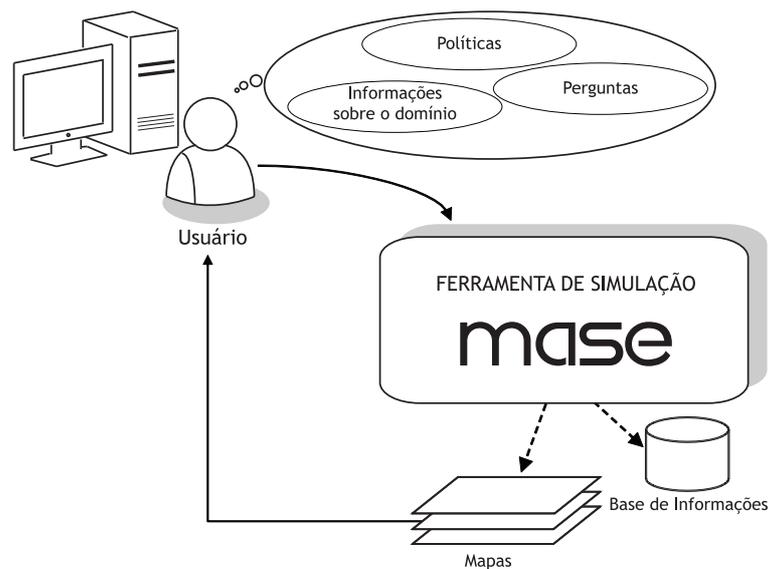


Figura 5.1: Visão Geral do propósito da ferramenta MASE.

difundidas, bem como da comparação dos resultados com outros modelos já descritos na literatura. A validação do modelo será descrita pela comparação dos dados simulados com os dados observados. A meta é produzir uma ferramenta robusta e flexível o suficiente para permitir ao usuário representar a realidade em um ambiente computacional de simulação, e a partir daí permitir extrapolações para gerar conhecimento ou auxiliar a tomada de decisão.

Conforme delimitado na Seção 1.3, não é escopo do trabalho discutir minuciosamente aspectos de tecnologia e desempenho da ferramenta, mas focar na implementação da aplicação e nos aspectos de interdependência entre a modelagem baseada em indivíduos e os SMA. Isso posto, a abordagem proposta pode ser sintetizada como um SMA híbrido de coordenação competitiva. SMA por ser a implementação de múltiplos agentes, os quais perseguem um objetivo de projeto. A abordagem de interação dos agentes pode ser definida como competitiva, uma vez que os agentes do uso da terra concorrem pelos mesmos recursos dentro do *grid* de simulação e podem ter objetivos distintos e concorrentes. A abordagem híbrida se refere à comunicação e interação dos agentes, permitindo, uma abordagem multiescalar, conforme discutido na Seção 2.2.1.

Essas são as premissas iniciais para a caracterização da ferramenta de simulação ambiental baseada em SMA, denominada MASE - *MultiAgent System for Environmental Simulation* (Figura 5.2). As cores que identificam a ferramenta remetem ao verde e ao amarelo usado comumente para classificar as áreas naturais e antrópicas, em imagens derivadas de SIG. As curvas que compõem o símbolo referem-se à dinamicidade presente nas aplicações ambientais. Além disso, a abreviatura MASE é homônimo da palavra em inglês *maze*: labirinto, geralmente atribuída para indicar complexidade e incerteza.

Nesse ponto faz-se necessário ressaltar a diferença entre a Ferramenta e o Modelo. A ferramenta é um *software* ou programa de simulação computacional, com múltiplos níveis de agentes genéricos, além de funcionalidades auxiliares. A ferramenta constitui o meio pelo qual o modelo do usuário poderá ser simulado e será apresentada em detalhes na Seção 5.3. Já o modelo restringe-se ao conjunto de especificações dos agentes, seus

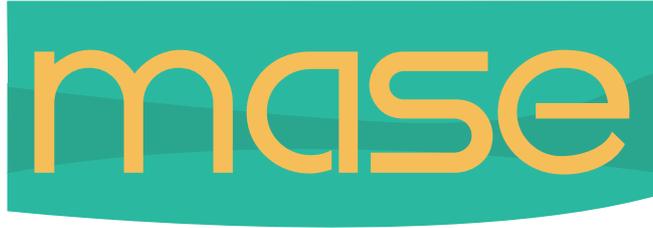


Figura 5.2: Identidade da ferramenta MASE - *MultiAgent System for Environmental simulation*.

atributos, seus comportamentos e suas relações. É no modelo que estão embutidas as perguntas, as hipóteses e os estudos de caso que poderão ilustrar o uso da ferramenta e validar o modelo definido. O modelo deve ser descrito pelo usuário. Assim, para explorar o potencial da ferramenta, um modelo de uso e cobertura da terra foi proposto (ver Seção 5.2). O programa deve ser flexível para permitir a variação dos parâmetros de entrada e saída, que caracterizarão o modelo do usuário.

A descrição de toda a aplicação MASE (modelo+ferramenta) é apresentada neste capítulo, tendo por início a discussão da caracterização empírica para o modelo baseado em agentes, em seguida, a estrutura conceitual definida para o modelo e, finalmente, o *software* MASE, incluindo sua arquitetura e seus aspectos de implementação.

5.1 Caracterização Empírica

Tanto para a descrição do modelo quanto da ferramenta, alguns parâmetros devem ser elucidados com atenção para que a proposta final e seus resultados sejam compreensíveis e passíveis de análise e discussão. Para aplicações em que a subjetividade das decisões humanas está presente, esse é um passo primordial para a robustez da proposta.

A implementação dos processos de decisão humana é a principal força de um modelo baseado em indivíduo, mas as funções de respostas comportamentais que representam esses processos requerem suporte de fontes empíricas qualitativas e quantitativas. Entretanto, de acordo com [Robinson et al. \(2007\)](#) e [Berger e Schreinemachers \(2006\)](#), não existe uma abordagem padrão para documentar as bases empíricas que fundamentam a modelagem e as decisões de projeto em um modelo baseado em agentes. Por essa razão, o trabalho ora descrito utiliza um conjunto de métodos específicos, comumente utilizados na prática, tendo por referência [Smajgl et al. \(2011\)](#), que propõe a estrutura de metodologia para os processos de parametrização do comportamento humano em IBMs.

Há duas etapas fundamentais em que os dados empíricos são necessários: (i) o desenvolvimento de categorias comportamentais, ou tipologias, e (ii) a escala para toda a população de agentes. O desafio envolve a representação de populações maiores, identificando métodos empíricos adequados para elicitare comportamentos, onde os dados baseados em amostras precisam ser traduzidos em representações comportamentais para toda a população (fenômeno que [Smajgl et al. \(2011\)](#) denominam *up-scaling*). Tendo por base essas orientações, a proposta MASE busca utilizar a abordagem de *up-scaling* proporcional, assumindo que a amostra de agentes representa toda a população.

[Smajgl et al. \(2011\)](#) sintetizaram em um quadro global o conjunto de métodos mais comumente usados para a parametrização empírica de respostas humanas. São eles: (i) o

conhecimento de especialistas, (ii) a observação participante, (iii) as pesquisas sociais, (iv) entrevistas, (v) os dados derivados de censos, (vi) experimentos de campo ou laboratório, (vii) RPG, (viii) análise de *cluster*, (ix) dasimetria (*dasymetric mapping*) e, finalmente, o (x) método de Monte Carlo. Relativamente à pesquisa realizada, são utilizados os métodos de parametrização (i), (v) e (vi), a saber:

- Conhecimento de Especialistas (CE) - abrangendo uma variedade de métodos formais e informais para capturar o entendimento de especialistas nos processos de tomada de decisão na área ambiental, bem como no mapeamento e monitoramento da cobertura da terra e na dinâmica do uso e ocupação dos territórios brasileiros. Foram consultados analistas ambientais do Ibama, e pesquisadores do Instituto de Biologia da UnB e do IBGE. Até o momento não foram aplicados métodos para quantificar as incertezas associadas ao conhecimento de especialistas.
- Dados derivados de Censos (DC) - incluindo dados GIS, para a compreensão da distribuição da população, das taxas de mudança e da associação entre os tipos de uso da terra, especificamente para a área em estudo. Foram utilizados os dados do Censo Demográfico dos anos 2000 e 2012, além dos resultados do Censo Agropecuário de 2006¹, com atualizações em 2009. Para esse mister contou-se com o apoio de pesquisadores do IBGE e do Departamento de Estatística da UnB. Um estudo preliminar de distribuição por setor censitário das informações derivadas do Censo (população, número de empreendimentos agropecuários, área por cultura e pecuária) já foi iniciado, não tendo sido, todavia, incorporado à atual versão da ferramenta.
- Experimentos em Laboratório (EL) - projetados no ambiente de simulação para observar como a mudança de variáveis independentes afeta uma variável dependente como, por exemplo, alterar o número de agentes na grade de simulação, melhorar o grau de exploração da terra por diferentes tipos de agentes, e outros testes para estabelecer um comportamento mais realista a ser observado no modelo.

Após a identificação das classes mais comuns de métodos utilizados para delinear a pesquisa em andamento, é necessário, desenvolver a representação sistemática de três fenômenos principais: agentes, as redes sociais dos agentes e o ambiente em que estão inseridos. Entretanto, o trabalho de [Smajgl et al. \(2011\)](#) foca unicamente a parametrização dos agentes humanos. A descrição das interações entre os agentes e do ambiente em que estão inseridos pode ser conferida na Seção 5.3.1. Para a parametrização dos agentes, foram identificados seis passos metodológicos, cada uma com vários métodos empíricos disponíveis. A Figura 5.3 apresenta a parametrização do agente usado no presente trabalho, conforme a metodologia adotada.

As seis etapas e os métodos empíricos utilizados para a parametrização do MASE não possuem representatividade plena e irrestrita. Entretanto considera-se que sejam completos o suficiente para a construção de parâmetros adequados para as respostas comportamentais humanas, elicitadas empiricamente. Os métodos utilizados na construção do MASE são sintetizados na Tabela 5.1 e descritos a seguir:

- Metodologia 1 (M1) - identificar as diferentes classes de agentes, assumindo que os agentes que compartilham a mesma sequência de ações, ou representam o mesmo

¹<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>

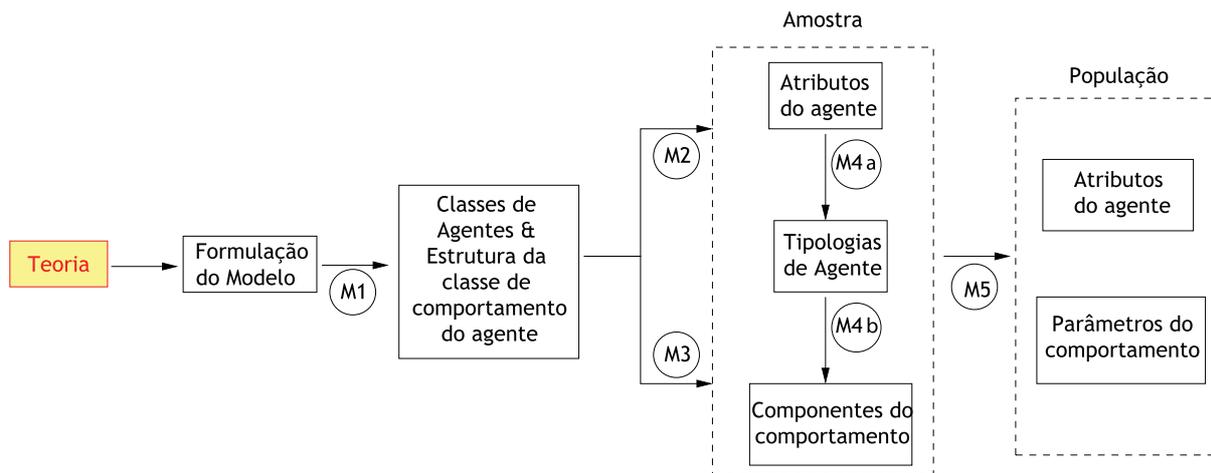


Figura 5.3: Parametrização dos agentes MASE (adaptado de [Smajgl et al. \(2011\)](#)).

comportamento modelado, são definidos em uma mesma classe ou tipologia de agente. As tipologias dos agentes foram definidas com base nas informações existentes na literatura, no conhecimento de especialistas, experimentos de laboratório e dados do censo. Na implementação, cada classe de agentes pode ser dividida em tipos ou subclasses, conforme [Russel e Norvig \(2010\)](#): agentes reflexivos simples, agentes reflexivos com registro de estados, agentes orientados a objetivos e agentes baseados em utilidade. A ferramenta se utiliza de uma composição de todas essas subclasses. A descrição das classes de agentes implementadas pode ser conferida na Seção 5.3.1;

- Metodologia 2 (M2) - especificar valores para os atributos dos agentes, considerando que tanto os parâmetros que regem a magnitude das ações quanto a medida em que as fontes de informação influenciam essas ações, são variáveis. As tipologias dos agentes podem ser definidas pela agregação de atributos dos agentes ou pelo comportamento do agente. A ferramenta MASE elicou dados de modo a mensurar os atributos e as respostas comportamentais verossímeis à realidade. Os atributos dos agentes transcrevem discretamente as características que eram sempre atribuídas, na literatura ou pelos especialistas, às entidades espaciais, sociais e políticas envolvidas no modelo. As respostas comportamentais derivaram da observação de percepções qualitativas, expressas pelo conhecimento do especialista, e variáveis quantitativas associadas ao contexto, tendo por base as informações GIS disponíveis e os dados provenientes dos censos demográfico e agropecuário. Por exemplo, os agentes transformadores têm diferentes respostas comportamentais, sendo possível distingui-los pelos padrões de uso da terra, conforme detalhado na Seção 5.2.3;
- Metodologia 3 (M3) - especificar parâmetros para as regras comportamentais dos agentes. Agentes com o mesmo comportamento e com parâmetros semelhantes de comportamento pertencem à mesma tipologia ou subclasse. Apesar de todos os agentes transformadores possuírem instruções semelhantes, como aumentar a sua área de atuação sobre o espaço, o modo como essa expansão se dá é tipicamente um componente do comportamento que varia dentro dos agentes transformadores.

Essas nuances entre os comportamentos foram determinadas conforme orientação do especialista. O agente gerente que controla todas as transformações e realiza a criação dos agentes, bem como confere permissão para a transformação e mediação de conflitos entre os agentes transformadores, necessariamente, deve ter o domínio sobre as diferenças sutis entre cada comportamento, utilizando-se de artifícios como uma máquina de estados finitos (*Finite State Machine*-FSM) para realizar esse controle. Os detalhes são posteriormente especificados na Seção 5.2;

- Metodologia 4a (M4a) - é possível construir tipologias a partir de atributos do agente quando esses utilizam métodos diferentes. Entretanto, ajustes são necessários quando o universo estudado possui um nível de detalhe bastante diverso do encontrado nas amostras. Para a pesquisa foi utilizado o conhecimento de especialistas e de trabalhos correlatos para sintetizar as tipologias gerais a serem utilizadas na ferramenta. Somente os padrões mais abrangentes, que poderiam ser atribuídos a uma grande parte de indivíduos foram considerados na definição da parametrização empírica do comportamento humano utilizado no modelo;
- Metodologia 4b (M4b) - a especificação dos componentes de comportamento para a amostra seguiu os mesmos princípios estabelecidos na etapa M4a. Com o apoio do grupo de especialistas e pesquisas na área, delimitou-se quais os componentes de caráter geral que poderiam ser extrapolados para o universo de comportamentos encontrados nos estudos de dinâmica do uso e da cobertura da terra. A preocupação subjacente às escolhas remete à necessidade de definição de um padrão de comportamento geral o suficiente para a simulação e ao mesmo tempo específico o suficiente para retratar a realidade;
- Metodologia 5 (M5) - após a definição dos tipo de agente, de seus atributos e comportamentos, ocorre a definitiva escala para a população em estudo. Conforme citado, a abordagem *up-scaling* foi utilizada, assumindo que a amostra (ou subpopulação) modelada pode ser generalizada para a população, conforme processo representado na Figura 5.3. Uma vez que foram consultados os dados dos censos agropecuário e demográfico do IBGE, bem como a literatura já consolidada para o assunto e a percepção dos especialistas, existem elementos suficientes para indicar que a amostra utilizada no modelo é representativa da população, de modo que a escala seja proporcional.

Tabela 5.1: Parametrização das características comportamentais dos agentes humanos.

M1	M2	M3	M4a	M4b	M5
CE	CE	CE	CE	CE	DC
DC	DC				
EL					

CE - Conhecimento de Especialistas; DC - Dados derivados de Censos; EL - Experimentos em Laboratório.

O *framework* para a parametrização de IBMs proposto por Smajgl et al. (2011) é apresentado como uma estrutura inicial que pode ser usada nas discussões de métodos mais rigorosos de parametrização para o comportamento humano nessa classe de modelos. A aplicação desse framework para delinear as decisões acerca dos parâmetros utilizados para

a proposta de trabalho teve por objetivo esclarecer como algumas decisões de projetos foram tomadas. Além disso, com a aplicação dos métodos M1 a M5 para a parametrização do modelo foi possível o desenvolvimento de um modelo empírico mais robusto, no qual a sequência de caracterizações facilita a descrição e a documentação da aplicação. Por fim, a descrição das decisões de projeto por meio de uma estrutura comum busca facilitar a replicação dos esforços empreendidos nessa pesquisa. A partir dessa visão geral da metodologia empregada para a parametrização é possível ter mais clareza frente às descrições do modelo e da ferramenta, descritas nas seções subsequentes.

5.2 Modelo de Cobertura e Uso da terra para o Cerrado

O modelo de uso e cobertura da terra proposto é um IBM/ABM (ver Seção 2.2), projetado pra exigir características especiais da ferramenta de simulação com agentes, tais como autonomia, coordenação, competição e comunicação, conforme apresentado na Seção 3.2. As definições do modelo basearam-se nos trabalhos já consolidados de [Smith et al. \(1998\)](#), [Haggith et al. \(2003\)](#), [Le et al. \(2008, 2010\)](#), bem como do conhecimento de um grupo de especialistas do Ibama, IBGE e UnB, que auxiliaram na definição dos agentes, comportamentos e parametrizações.

Como criticado por [Lorek e Sonnenschein \(1999\)](#), as descrições de IBMs carecem de consistência, sendo por vezes incompletas, ambíguas ou não oferecendo dados suficientes para a replicação dos resultados. Para evitar esses problemas, optou-se pela adoção do protocolo ODD (ver Seção 2.2.3), proposto por [Grimm et al. \(2006\)](#). Por meio de uma sequência de elementos agrupados, o contexto e as informações gerais são fornecidas primeiro - visão geral (Seção 5.2.1), seguidos por considerações mais estratégicas - conceitos de projeto (Seção 5.2.2), e finalmente fornecendo os detalhes técnicos (Seção 5.2.3).

5.2.1 Visão Geral

Propósito

O propósito do modelo é entender como o comportamento de agentes humanos, o ambiente físico e as decisões políticas afetam a dinâmica do uso e cobertura da terra. Ao observar como essas variáveis interagem é possível explorar causas e consequências e formular cenários úteis para os processos de planejamento e tomada de decisão. Os resultados não devem ser utilizados de maneira preditiva, mas sim como ferramenta para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para o uso da terra.

Pela associação de dados sobre a distribuição espacial e quantidade de mudança na cobertura da terra às variáveis físicas do ambiente e ao comportamento de agentes humanos, seja na exploração do ambiente em si, seja na formulação de políticas de uso da terra, é possível testar hipóteses bem como discutir possíveis explicações sobre os mecanismos da dinâmica do uso e ocupação da terra.

Entidades, variáveis de estado e escalas

A estrutura conceitual do modelo, representada na Figura 5.4, aborda as questões de mudança do uso da terra por meio de agentes transformadores do uso da terra (representativos das mudanças socioeconômicas) e agentes espaciais (representativos das mudanças

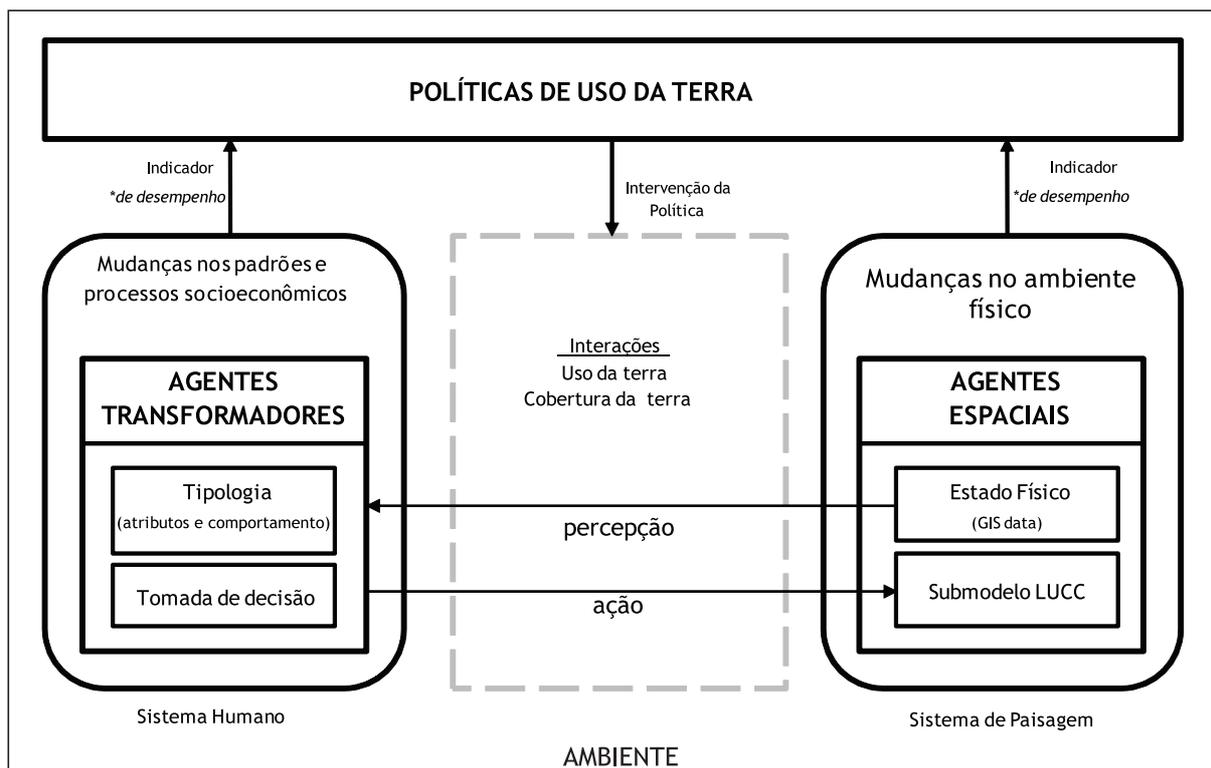


Figura 5.4: Diagrama da estrutura conceitual do modelo.

no ambiente físico). Sobre essas interações agem as políticas relacionadas ao seu uso, que influenciam as percepções e ações desses agentes ao longo do tempo e do espaço.

O sistema de paisagem é representado por agentes espacialmente explícitos, denominados agentes espaciais. A menor unidade de representação do espaço é a célula, resultado da divisão da região em análise em um *grid* de simulação. Um agente espacial corresponde a uma célula. O estado físico dos agentes espaciais é definido por duas variáveis de estado: a classe de cobertura e o seu potencial para exploração/conservação. A classe de cobertura corresponde à classificação da cobertura da terra para a célula específica, sendo: (i) áreas antrópicas e (ii) áreas de vegetação natural (remanescentes). O potencial de cada agente espacial é a variável que quantifica a magnitude de recurso natural que está contido na célula. Esse potencial pode ser atrativo para exploradores, que dilapidam esse recurso ou atrativo para ações conservacionistas, estabelecendo os pontos prioritários para conservação. Esse potencial é diferenciado para cada classificação da cobertura da terra, sendo que o potencial de exploração de uma área de vegetação natural é maior que o potencial de uma área antrópica, por exemplo. Um submodelo das transições de uso da terra permite que cada agente espacial mude seus atributos ao longo do tempo, resultado da ação dos agentes de transformação em cada célula e na vizinhança. Dessa maneira, o padrão de alteração da paisagem é resultante das composição das mudanças ecológicas que ocorrem na escala dos *pixels*. Cada agente espacial sabe qual a sua posição no *grid* de simulação e possui uma variável que controla se aquele espaço está sob a ação de um agente transformador durante o *time step*.

Ainda conforme a Figura 5.4, o sistema humano é considerado em termos de agentes transformadores do uso da terra, os quais foram definidos inicialmente com quatro tipos

distintos: agricultor, pecuarista, urbanizador e conservacionista. Um agente transformador é a unidade mínima para a representação das variáveis que simulam o comportamento humano. Os agentes transformadores possuem tipologias diferentes (ver também Seção 5.1) e para cada uma, um conjunto de comportamentos definidos a partir da literatura e da consulta à especialistas. O mecanismo de tomada de decisão de um agente transformador advém das percepções do estado do ambiente, do sistema de paisagens - na forma de um mapa de utilidade, e do comportamento definido para cada tipo de agente. É influenciado pelas políticas que estão sendo testadas no modelo. O modelo de decisão é probabilístico e universal para qualquer agente transformador. Entretanto, as decisões são diversas devido à tipologia, comportamento e estado do ambiente para cada caso.

O ambiente físico é espacialmente representado por um conjunto de camadas de dados provenientes de GIS, também denominadas variáveis proximais, incluindo: (i) ferrovias, (ii) rodovias, (iii) ruas, (iv) edificações, (v) cursos d'água, (vi) corpos d'água e (vii) Unidades de Conservação. O conjunto dessas camadas caracteriza o ambiente físico em qualquer ponto do *grid* de simulação. Tanto o sistema de paisagem quanto o sistema humano têm suas percepções relacionadas à caracterização do ambiente físico.

A política de uso da terra é a entidade que representa as políticas setoriais que influenciam a interação entre o sistema de paisagens e os sistemas humanos. As políticas podem influenciar o comportamento dos agentes transformadores ou delimitar áreas de atração ou repulsão de agentes no ambiente. As interações entre o sistema humano e o sistema da paisagem advém dos ciclos de percepção e ação entre os agentes transformadores e os agentes espaciais. A percepção corresponde ao estado do ambiente físico na célula e em sua vizinhança, bem como dos benefícios e subsídios fornecidos pelas políticas relacionadas ao uso da terra. A ação é o efeito da decisão do agente transformador na alteração do ambiente pelo uso da terra.

Em relação às escalas, tanto a escala temporal quanto a espacial podem ser configuráveis. A estrutura é genérica de modo a permitir a exploração do espaço local, regional ou global, no espaço de tempo adequado ao problema. Entretanto, para o modelo especificado, trabalha-se na escala local-regional, com cada célula do *grid* representa um hectare (1ha). Cada *time-step* equivale a uma semana de tempo cronológico. As simulações foram executadas por 7 (sete) anos (2002-2008), sendo necessários 365 *time-steps*. As entidades e variáveis de estado são sintetizadas na Tabela 5.2.

Visão geral do processo e programação

Na execução do modelo, as interações se sucedem a cada *time step*. O *grid* da paisagem inicial é dado por imagens obtidas de arquivos raster de GIS para cada variável. A população inicial dos agentes é gerada pelo SMA, descrito na Seção 5.3. Os usuários podem definir a população inicial de cada tipo de agente, assim como quais políticas e parâmetros serão explorados no modelo. Inicialmente há o pré-processamento do submodelo de uso e cobertura da terra (LUCC) e das informações GIS que definem o ambiente físico (variáveis proximais). A cada *step* há a atualização do estado do ambiente, seguido pela tomada de decisão do agente transformador.

O tempo é modelado por intervalos discretos de tempo (*time steps*). Todas as atividades acontecem de forma atômica: somente após todas as ações terem sido deliberadas e

Tabela 5.2: Entidades e variáveis de estado do modelo MASE.

Visão Geral		
Entidades	Variáveis de estado	Valores (<i>exemplos</i>)
<i>Agente Espacial</i>	Classe de cobertura	Áreas antrópicas ou áreas de vegetação natural
	Potencial	Valor absoluto. Ex.: 1500 unidades para área de vegetação natural e 500 unidades para áreas antrópicas
	Ocupação	<i>Sim</i> ou <i>Não</i>
	Posição	Localização no <i>grid</i>
<i>Agente Transformação</i>	Tipologia	Agricultor, Pecuarista, Urbanizador e Conservacionista
	Mapa de utilidade	Composição da influência do ambiente e de outros agentes transformadores
	Comportamento	Regras de comportamento definidas por tipologia
<i>Ambiente</i>	Variáveis Proximais <i>camadas GIS</i>	Ferrovias, rodovias, ruas, edificações, cursos d'água, corpos d'água e unidades de conservação
<i>Política</i>	Caracterização	Ex.:Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT

executadas pelos agentes há a transição de *time step* e a execução do grupo de atividades. As variáveis são atualizadas sincronamente, sem ordem especial de execução dentro de um mesmo *time step*.

Processos individuais incluem a alocação dos agentes transformadores, a tomada de decisão baseada no ambiente e na política, a transformação da terra (exploração ou conservação), a influência da vizinhança e a movimentação (Figura 5.5). Para iniciar a simulação, o modelo seleciona, conforme as variáveis de ambiente, a localização dos agentes exploradores e os aloca em uma célula. Os agentes espaciais atualizam a *flag* de ocupação. O modelo avalia a disposição dos agentes transformadores pelo espaço, iniciando os processos de decisão, seguido da transformação da terra e movimentação. Cada agente transformador é processado simultaneamente, influenciando as células em sua vizinhança. Somente os agentes espaciais que se encontram no raio de ação do agente transformador têm suas variáveis atualizadas, também, simultaneamente. Após o processamento de todos os agentes transformadores e espaciais, o modelo adianta o tempo em uma semana, e continua as iterações por um total de sete anos de simulação.

5.2.2 Conceitos de Projeto

Os conceitos de projeto, comuns na descrição de modelos IBM/ABM, utilizados na elaboração do modelo proposto, são descritos nesta seção.

Princípios Básicos - As atividades antrópicas são a principal força responsável pelas alterações na cobertura e uso da terra;

Emergência - A dinâmica da população de agentes humanos emerge a partir do comportamento de cada um dos agentes, nas decisões de uso do terra que caracterizam cada tipologia. Entretanto, o ciclo de vida de cada agente, bem como seus comportamentos são completamente descritos por regras empíricas. As mudanças no sistema da paisagem emergem unicamente do processo de conversão e modificação do uso da terra causado pelos agentes transformadores. A dinâmica do uso da terra emerge como um resultado do processo de modelagem;

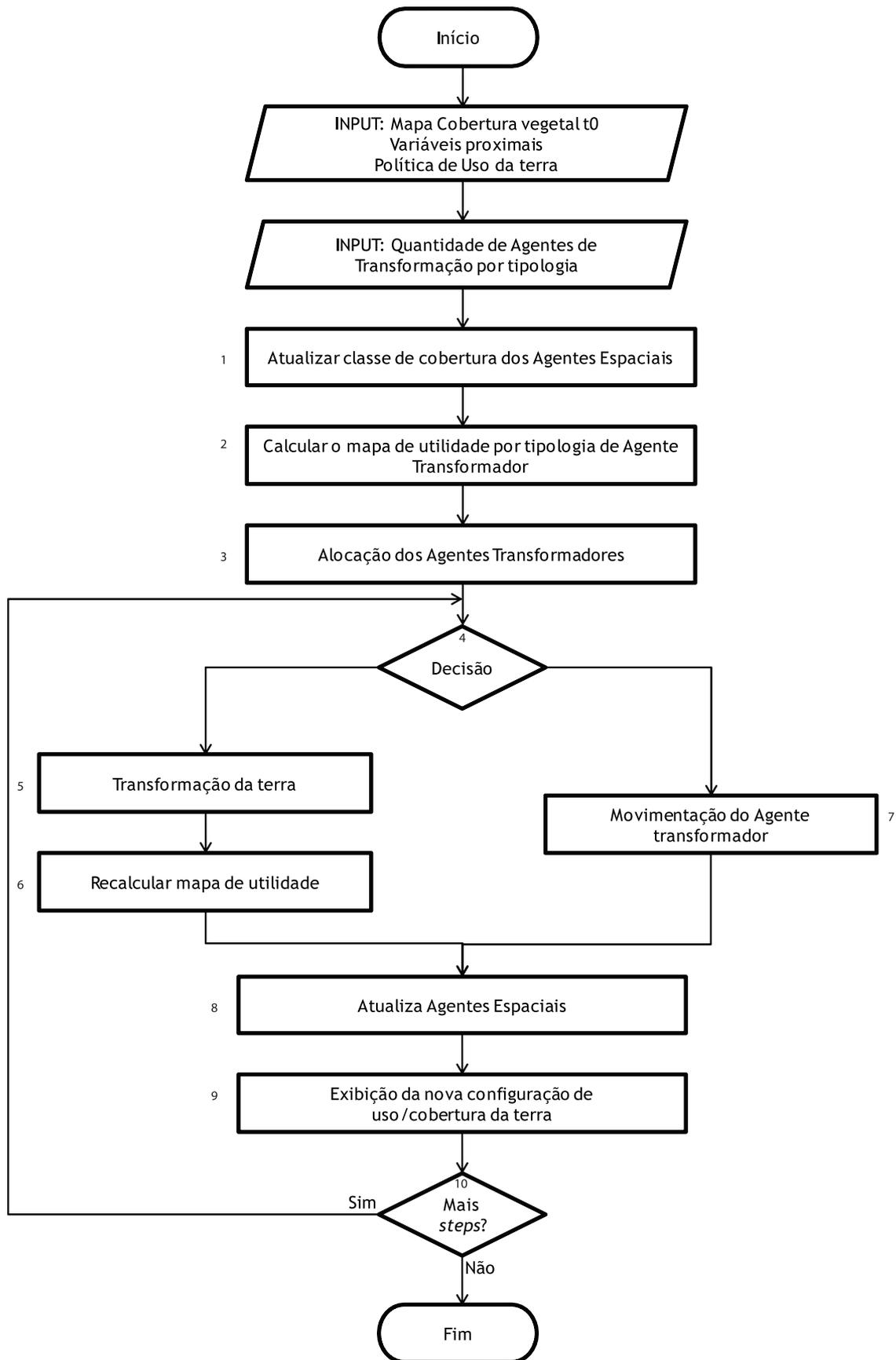


Figura 5.5: Fluxograma do modelo MASE com a apresentação da programação dos principais eventos e cálculos.

Adaptação - Tanto os agentes espaciais quanto os agentes transformadores possuem características adaptativas. Quando uma célula é explorada, as células da vizinhança ao seu redor ficam mais suscetíveis a exploração. Da mesma maneira, quando uma célula é preservada, a tendência é que sua vizinhança também permaneça preservada. Dessa maneira, os agentes espaciais que representam as células tem o seu potencial de exploração/conservação alterado em função do que acontece com as células vizinhas, em uma espécie de reprodução do comportamento observado de suas redondezas. Os agentes de transformação possuem característica adaptativa semelhante. Quando um agente transformador inicia uma exploração da terra em determinado local do espaço, ele influencia a percepção dos demais agentes, aumentando a probabilidade de que outros agentes transformadores passem a agir nas proximidades dessa atividade de exploração. O resultado dessa característica é a possibilidade de formação de manchas de agentes exploradores, que ao mesmo tempo em que se atraem, podem repelir-se por competição. Esse fenômeno é observado naturalmente nos resultados da simulação;

Percepção - Cada agente transformador sabe sua tipologia e capacidade de conversão ou exploração do ambiente, de modo que eles possuem, por exemplo, mapas de utilidade específicos dependendo do estado do ambiente em que estão inseridos. Os agentes transformadores percebem a sua posição do espaço e da sua vizinhança, bem como o potencial de exploração/conservação de cada uma das células. Também percebem as variáveis físicas do ambiente e a caracterização da política que pode estar sendo testada. Os agentes espaciais percebem sua localização no espaço e a sua vizinhança. As células também possuem estado interno que controla o quanto podem ser exploradas ou conservadas;

Coletivos - Os indivíduos são agrupados por tipologias, que podem ser caracterizados como *coletivos* segundo a metodologia ODD. Os agricultores, os pecuaristas, os urbanizadores e os conservacionistas formam grupos sociais que compõem um nível intermediário de organização no modelo baseado em indivíduos. De modo semelhante, o conjunto de agentes espaciais representam o espaço. Note que tanto o comportamento de cada célula como o comportamento coletivo do espaço podem ser distinguidos nessa abordagem;

Fitness - A aptidão dos agentes, ou o cumprimento dos objetivos, são explicitamente modelados na tomada de decisão dos agentes de transformação do uso da terra. Cada agente verifica qual é a área em que poderá ter maior quantidade de exploração, por meio de mapas de utilidade, e orienta suas ações para essas direções, de modo que retire da terra a maior quantidade possível de recursos e transforme a maior área possível, ou, de modo a preservar a maior extensão de área e recuperar o maior número de células. As aptidões dos agentes variam conforme a tipologia.

Interação - Os agentes interagem direta e indiretamente. Interações indiretas envolvem o fato que alterações no uso da terra causadas por um agente podem levar a mudan-

ças nas decisões de outros agentes no step seguinte. A interação direta acontece na disputa pelo espaço, quando dois agentes encontram a maior atração para a exploração em uma mesma célula do espaço. Nesse caso, regras de sucessão entre tipologias diferentes são aplicadas ou um agente é escolhido de maneira aleatória entre agentes de mesma tipologia em que está integrado. Esta característica deixa claro a autonomia dos agentes na tomada de decisão de suas movimentações e transformações do uso da terra;

Observação - O processo de observação da simulação, ou comunicação dos resultados, inclui a visualização de mapas sucessivos da cobertura e do uso do terra, um para cada *time step*.

5.2.3 Detalhes

Inicialização

A configuração inicial da simulação é definida pelo usuário. O ambiente inicial do modelo é escolhido de maneira determinística, tendo como dado de entrada uma imagem classificada (derivada das imagens *raster*-GIS obtidas dos programas de monitoramento por satélite) que representa o mapeamento da cobertura ou uso da terra para determinado período, considerado como o t_0 . O modelo está configurado para carregar a imagem classificada do Cerrado no ano de 2002 como imagem inicial e considerar este momento como o momento t_0 , tendo em vista esta imagem ser a imagem mais antiga disponível do projeto de monitoramento dos biomas.

O ambiente físico também é importado em um conjunto de imagens, determinado pelo usuário, que correspondem às denominadas variáveis proximais, ou variáveis de interesse. Considerando a presença de hidrografia, ferrovias, rodovias, ruas, edificações e unidades de conservação como variáveis de interesse, cada uma dessas imagens seria importada no modelo. Essas são as variáveis que são consideradas como padrão para as análises efetuadas. O número de agentes espaciais é calculado conforme a definição de resolução do usuário, mas tem por padrão basear-se na quantidade de *pixels* das imagens importadas. Vale ressaltar que o conjunto de imagens do mapeamento da cobertura da terra, bem como de todas as variáveis proximais, deve, obrigatoriamente, possuir a mesma largura e altura, portanto, a mesma quantidade de *pixels*.

Após a criação do ambiente e do espaço, dá-se a criação dos agentes transformadores. O número de agentes é criado conforme parâmetro do usuário para cada uma das tipologias. Os agentes são criados simultaneamente. Entretanto, o processo de alocação (ver Figura 5.5 - passo 3) ocorre por tipologia, conforme conjunto de regras definidas pelo especialista. Por padrão, os parâmetros iniciais são estabelecidos conforme caracterização empírica descrita na Seção 5.1. Para o modelo em questão, inicia-se com 40 agentes de cada tipologia. A discussão desse parâmetro é descrita na Seção 6.2.

Todos os agentes transformadores são alocados no espaço após uma fase de pré-processamento do mapa de utilidade (Figura 5.5 - passo 2), onde são alocados espacialmente nos locais de maior pontuação (ou *score*). Dessa maneira, para um mesmo conjunto de variáveis, o estado inicial é sempre o mesmo para todas as simulações.

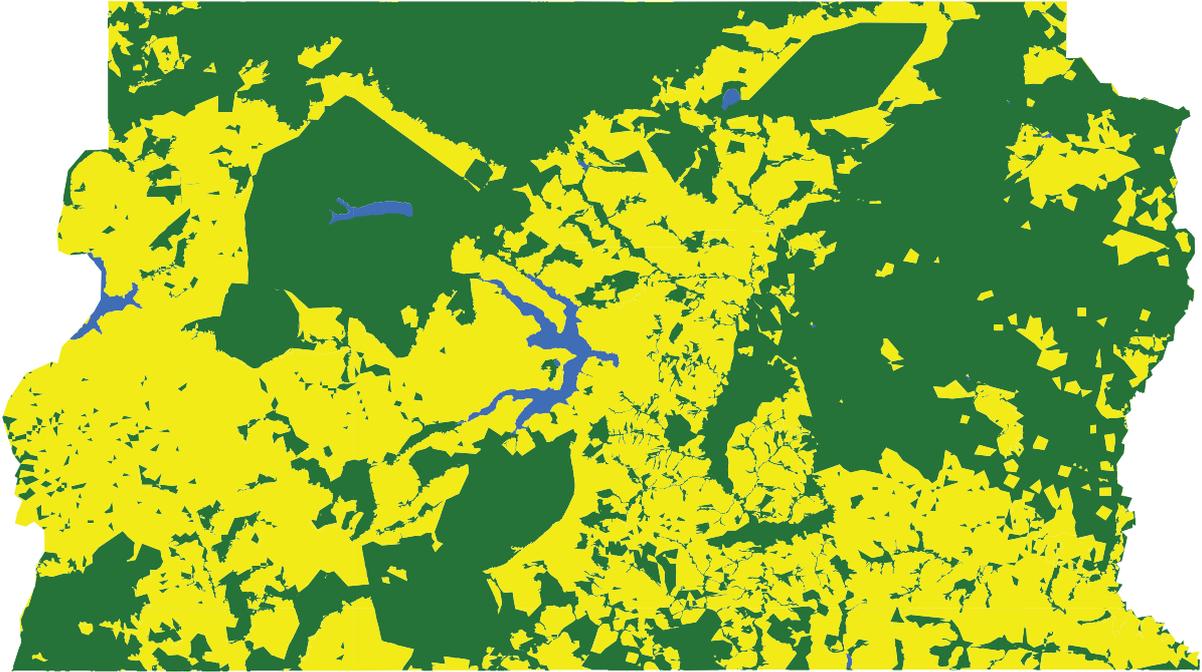


Figura 5.6: Mapa de entrada da área de estudo.

Entrada de dados

A dinâmica de muitos modelos IBM é dirigida por condições ambientais que mudam no espaço e no tempo. As condições ambientais são uma entrada para o modelo. A saída do modelo corresponde a uma resposta aos parâmetros iniciais, ou dados de entrada. Para a simulação base, os dados de entrada foram definidos para que o modelo minimamente se assemelhasse às condições de cobertura da terra já relatadas por especialistas e grupos de pesquisa. Segue a descrição das entradas de dados utilizados no MASE, de modo a permitir que o modelo possa ser reproduzido. As variáveis externas que servem de entrada para os processos de simulação são:

1. Imagem classificada da área de estudo (Cobertura da terra do Cerrado - 2002);
2. Conjunto de imagens que representam as variáveis proximais (conforme Seção 6.1.3);
3. Conjunto de informação política a ser explorado (os parâmetros das imagens espacializadas conforme Seção 6.1.4).

Um exemplo de imagem de entrada pode ser conferido na Figura 5.6. A figura ilustra uma área de estudo em um determinado t_0 . É necessário que a imagem *raster* da cobertura da terra do espaço a ser simulado esteja classificada. Na ilustração em questão, estão sendo utilizadas as classes “antrópica” (amarelo), “remanescente” (verde) e “corpo d’água” (azul).

Modelos de simulação também requerem, como entrada, um conjunto de dados cartográficos. As imagens que representam as variáveis de ambiente ou variáveis proximais também devem ser imagens *raster*, de preferência na mesma resolução que a imagem de entrada. As variáveis de ambiente devem ter como máscara o espaço considerado para

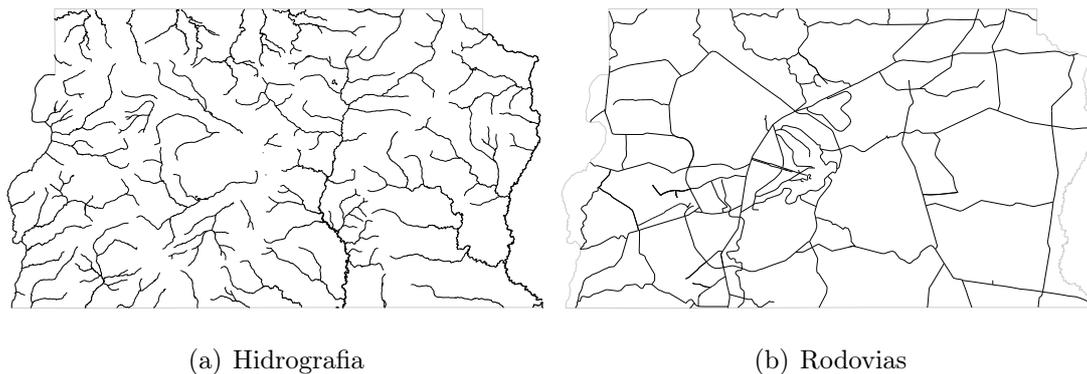


Figura 5.7: Exemplos de imagens de entrada das variáveis proximais.

o estudo. Cada variável proximal é uma imagem de duas classes. A classe que identifica a característica e a classe que representa a ausência da característica ou *no data*. A Figura 5.7 ilustra duas variáveis proximais consideradas no modelo. Para facilitar a visualização e o entendimento foi delimitado o limite da área de estudo em cada uma das imagens.

O conjunto de informação política a ser explorado pode ser espacializado ou não. Se as políticas estão definidas espacialmente, é possível carregar uma imagem classificada que corresponda à especialização da política. O Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) pode ser um exemplo de um instrumento político e de planejamento que influencia na dinâmica da cobertura e uso da terra e pode ser espacializado. Para as políticas que não podem ser assim caracterizadas, seus parâmetros deverão ser inseridos como regras no comportamento dos agentes.

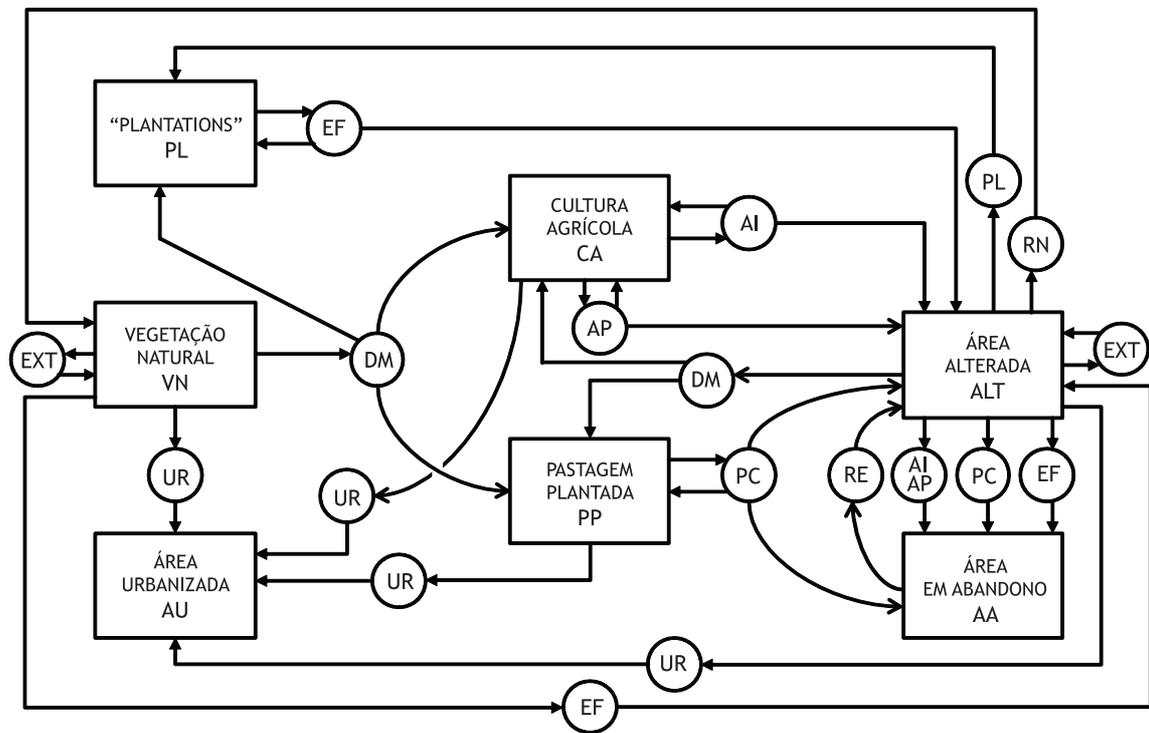
Submodelos

Os submodelos descrevem em detalhes os processos listados na visão geral e programação (ver Seção 5.2.1). São três os submodelos a serem descritos para o entendimento dos mecanismos de funcionamento do IBM proposto:

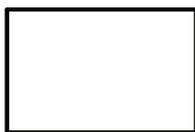
1. Submodelo LUCC;
2. Cálculo do Mapa de Utilidade;
3. Mecanismo de tomada de decisão do agente transformador.

Submodelo LUCC

Um modelo clássico que explica a dinâmica da fronteira agrícola na Amazônia e no Cerrado brasileiro, proposto por [Smith et al. \(1998\)](#) foi adotado como regra para as transições entre as classes da terra e os processos de transformação. Para balizar a caracterização dos parâmetros dos agentes espaciais, para especificar quais são as classes de cobertura e uso da terra utilizadas na simulação e, prioritariamente, para definir quais são as transições possíveis entre essas classes, identificou-se na literatura uma proposta consolidada, testada e disseminada, apresentada a seguir. As definições são uma síntese das lutas descrições providas pelo autor e podem ser sintetizadas na Figura 5.8.



LEGENDA:



Categorias do
Uso da Terra



Processos de
transformação



Sentido da
transformação

LISTA DOS PROCESSOS:

AG - Agricultura
CSV - Conservação
DM - Desmatamento
PC - Pecuária

UR - Urbanização
EXT - Extrativismo
EF - Exploração Florestal
AP - Agricultura Permanente

AI - Agricultura Itinerante
RE - Recuperação
PL - Plantação
RN - Regeneração Natural

Figura 5.8: Diagrama do modelo de uso da terra (adaptado de [Smith et al. \(1998\)](#)).

Na Figura 5.8, as caixas indicam as categorias ou classes de uso da terra, enquanto os círculos indicam os processos que geram as transformações. As setas na imagem representam as atividades permitidas para outros tipos de uso da terra. Embora a estrutura permita todo o universo de conversões, nem todo os espaços analisados terão que utilizar-se do fluxograma em sua completude. Uma simplificação do modelo de Smith pode ser efetuada para adequar-se ao espaço proposto para a simulação. Por exemplo, se o espaço de estudo apresenta usualmente apenas as categorias de terra como *vegetação natural (VN)*, *cultura agrícola (CA)*, *área urbanizada (AU)* e *pastagem plantada (PP)*, então somente essas quatro caixas e seus relacionamentos de transformação serão considerados.

O modelo proposto por Smith apresenta metáfora natural para as simulações baseadas em agentes. Embora no trabalho original tenha sido desenvolvido um modelo formal, na adaptação proposta os agentes de transformação podem, facilmente, ser considerados como os processos de transformação em curso. Ou seja, o processo de mudança da tipologia vegetação natural para cultura agrícola, acontece por meio de um processo de agricultura desenvolvido por um agente agricultor.

O submodelo LUCC é o guia norteador de todas as transformações de uso da terra que ocorrem no modelo. Ele é consultado e controlado pelos agentes espaciais, que o consultam para verificar se a transição pretendida pelo agente transformador é viável ou esperada. Ele também atua nos agentes transformadores, influenciando suas percepções e ações.

Cálculo do Mapa de Utilidade

O modelo considera que a exploração do uso da terra depende de um número de aspectos sociais, econômicos, geográficos e até políticos. Muitos desses fatores são difíceis de serem modelados ou formalizados. Entretanto, as informações físicas e geográficas podem ser facilmente mapeadas espacialmente e utilizadas para criar a simulação. De fato, técnicas de análise espaciais serão usadas para quantificar os efeitos espaciais das variáveis que afetam as mudanças nesse ambiente.

O conceito de variável proximal, em alguns trabalhos denominada também como variável estática, é bem estabelecido entre os modelos de simulação da dinâmica da terra (Soares-Filho et al., 2004). São as variáveis proximais que explicam as influências regionais na configuração espacial dos padrões de mudanças. A análise do efeito dessas variáveis resulta no mapa de utilidade (outros trabalhos também denominam mapa de favorabilidade ou mapa de probabilidade de mudança (Almeida et al., 2003; Le et al., 2010)).

As variáveis proximais utilizadas no modelo são: ferrovias, rodovias, ruas, edificações, cursos d'água, corpos d'água e unidades de conservação de proteção integral (UCPI). De uma maneira geral, é possível estimar o efeito dessa variável no ambiente ao seu redor, partindo da premissa que as variáveis sejam espacialmente independentes. Para cada tipologia de agente de transformação foram modeladas relações de estímulo (+), desestímulo (−) ou neutra (0), em relação à cada uma das variáveis proximais. Considera-se que algumas variáveis proximais estimulam o uso antrópico de áreas situadas em suas imediações. Por exemplo, estima-se que áreas próximas a ruas, edificações e rodovias já existentes são mais propensas ao processo de urbanização. A relação entre as variáveis proximais e os agentes transformadores podem ser conferidas na Tabela 5.3, as quais foram definidas pelos especialistas.

Tabela 5.3: Relações de estímulo entre as variáveis proximais e os agentes transformadores.

Agente Transformador	Variáveis Proximais						
	Ferrovias	Rodovias	Rua	Edificação	Curso d'água	Corpo d'água	UCPI
Agricultor	+	+	-	-	+	+	-
Pecuarista	+	+	-	-	+	+	-
Urbanizador	0	+	+	+	0	0	0
Conservacionista	-	-	-	-	+	+	+

Após essa definição inicial, cada uma das imagens de entrada (*input*), que representa uma variável proximal, foi tratada por uma rotina de filtragem passa-baixas (ver Apêndice A.2) com um filtro Gaussiano isotrópico (circularmente simétrico) bidimensional $h(x, y)$, apresentado na Equação 5.1 (baseada na Equação A.4), onde h e σ representam o tamanho do filtro e o desvio padrão, respectivamente, sendo parâmetros que podem ser ajustados conforme a necessidade do modelo.

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

O efeito deste filtro é o de suavização da imagem (*blur*) e visa reproduzir visualmente o resultado da ação de influência da variável ambiental em sua vizinhança. A Figura A.4, discutida no Apêndice A, mostra o filtro Gaussiano utilizado na geração da imagem da Figura 5.10 ($h_{size} = 11$ e $\sigma = 2$), escolhidos de maneira empírica, ilustrando a aplicação do filtro gaussiano para a variável *Edificações*. A Figura 5.11 mostra o detalhe ampliado dessa variável proximal, onde é possível notar a variação da escala de cinza em torno da zona edificada em destaque. As regiões mais claras na imagem representam os lugares onde existe uma maior probabilidade de ocupação da terra para uso antrópico. As áreas mais escuras, que estão circundadas por *pixels* mais claros, indicam regiões que não podem ser utilizadas durante o processo de simulação. Obviamente, pelo exemplo, não seria possível simular a conversão do tipo do uso da terra em uma área edificada já estabilizada.

Para todas as variáveis, suas imagens resultantes após a aplicação do filtro irão possuir zonas de influência e zonas impeditivas de exploração (por exemplo, dentro de um lago). A variável proximal *UCPI* possui uma característica distinta das demais variáveis proximais. Mostrada na Figura 5.12, tem o efeito de inibir o uso antrópico e estimular comportamentos de conservação. Na imagem ilustrada, a região em branco é uma área protegida e não pode ser ocupada para outros tipos de uso da terra.

Após terem sido geradas, as imagens filtradas são utilizadas no cômputo de uma média ponderada, de acordo com a Equação 5.2, onde T é o mapa resultante, M_i representa a imagem filtrada referente à variável proximal i e p_i indica quanto a variável i vai contribuir na geração do mapa T . Cabe ressaltar que o peso p_i engloba o estímulo definido na Tabela 5.2 em forma de sinal, de modo que para estímulo positivo (+) considera-se $p_i \cdot (1)$, para estímulo negativo (-), $p_i \cdot (-1)$ e finalmente para estímulo neutro (0), $p_i = 1$.

$$T = \sum_{i=0}^5 M_i \cdot p_i, \quad (5.2)$$

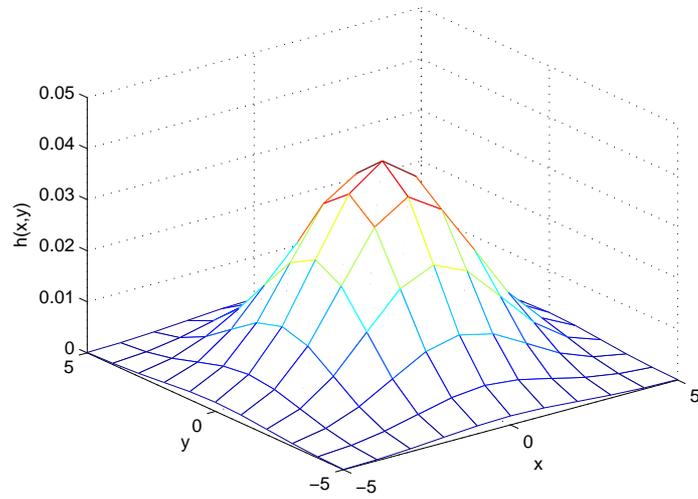


Figura 5.9: Filtro Gaussiano utilizado na geração das imagens mostradas nas Figuras 5.10 e 5.11.



Figura 5.10: Variável proximal *Edificações* após a aplicação do filtro Gaussiano (Equação 5.1).

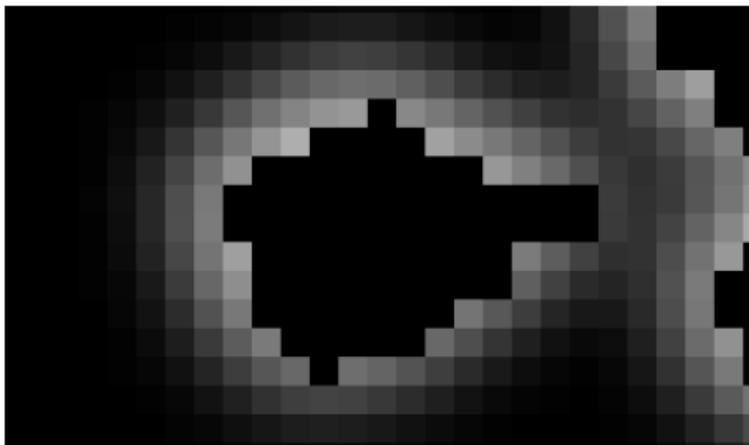


Figura 5.11: Parte ampliada da variável proximal *Edificações*.



Figura 5.12: Unidade de Conservação: inibe o uso antrópico.

Além disso, gera-se um mapa auxiliar T_{aux} que indica as regiões desabilitadas para qualquer tipo de uso, por constituírem Unidades de Conservação ou por serem áreas que já estão ocupadas. A Figura 5.13 mostra os mapas T e T_{aux} para uma área de Cerrado. Para a imagem em questão, todos os pesos p_i foram considerados iguais a $1/6$ e estímulo positivo.

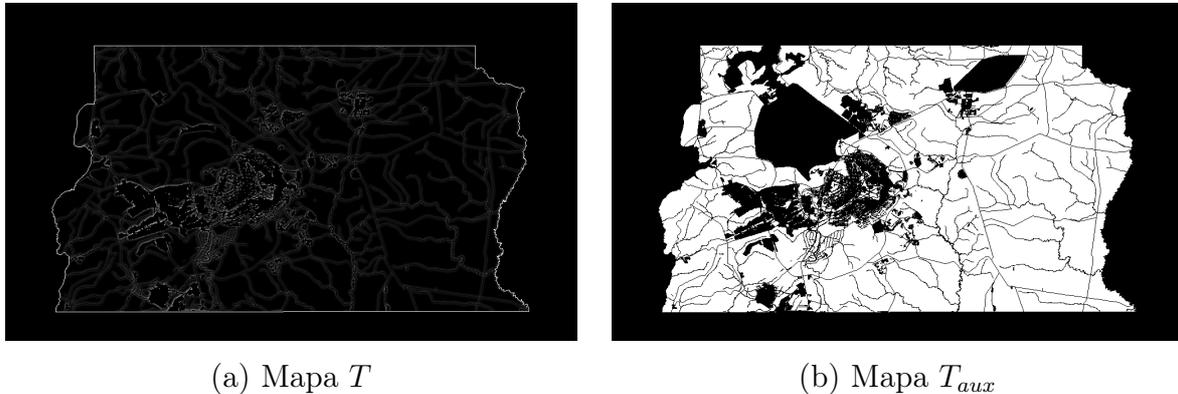


Figura 5.13: Mapas T e T_{aux} resultantes, utilizados como indicadores de propensão à ocupação. Em (a), regiões mais claras indicam maior propensão à exploração. Em (b), regiões mais escuras indicam a impossibilidade de exploração.

Cada tipologia de agente de transformação tem um mapa de utilidade, que corresponde ao mapa T resultante da aplicação do filtro Gaussiano para as variáveis proximais, considerando o estímulo de cada variável para a tipologia. Em termos práticos, o mapa de utilidade corresponde a uma imagem em que os níveis de cinza dos *pixels* determinam qual o fator de atração daquele agente transformador naquela configuração espacial. Um mapa de utilidade típico foi exemplificado na Figura A.1, que ilustra quanto maior a escala de cinza, ou seja, quanto mais claro é o *pixel*, maior é a vocação do agente em transformar aquela unidade espacial.

Mecanismo de tomada de decisão do agente transformador

Conforme o fluxograma de processos apresentado (Figura 5.5, as duas principais decisões que o agente pode tomar resumem-se à transformar o espaço em que está inserido (passo 5) ou movimentar-se para outro local do espaço (passo 7). Esse mecanismo de tomada de decisão considera o mapa de utilidade e o comportamento definido para o agente.

O agente transformador confere se o local em que está alocado ainda pode ser transformado (explorado ou conservado), recebendo informações do agente espacial pela variável de estado que determina o potencial da célula (ver Tabela 5.2). Se, por exemplo, houver na célula recursos suficientes para que o agente continue a explorá-la, ele ali permanece por essa interação. Se a célula já se encontra esgotada, o agente deve movimentar-se para outra região do espaço.

Para movimentar-se o agente analisa a sua vizinhança. É aplicado o conceito de vizinhança radial (ver Seção 2.2.1) para determinar o alcance da percepção do agente transformador. A Figura 5.14 mostra o conjunto dos diferentes mapas que são utilizados para determinar a movimentação de um agente transformador. Tomando como referência

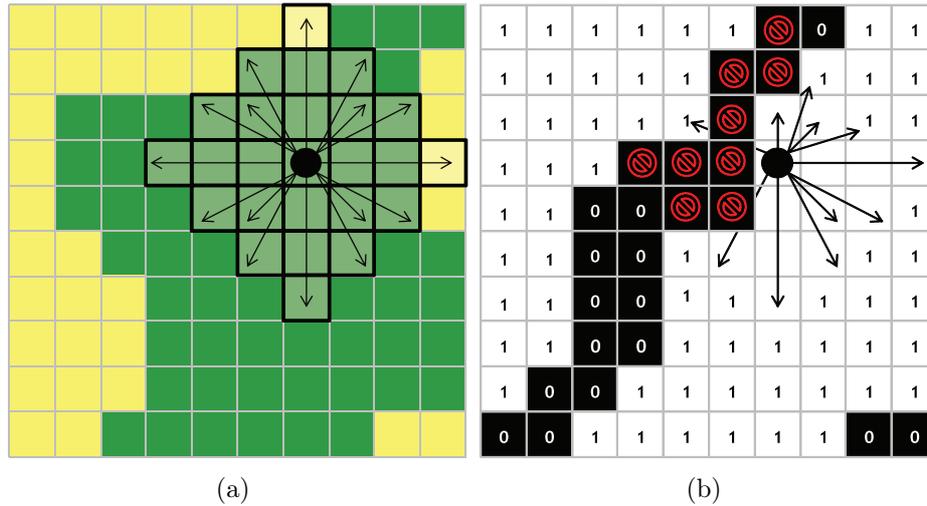


Figura 5.14: Ilustração do processo de deslocamento de um agente explorador a partir do mapa de uso antrópico, mostrado em (a), e dos mapas T_{aux} e T , mostrados em (b) e (c), respectivamente.

a ilustração da Figura 5.14 (a), que representa um segmento do *grid* de simulação, considere que áreas em amarelo são áreas que já possuem um nível de impacto antrópico, e áreas em verde são áreas remanescentes, com maior potencial de exploração. O círculo indica um agente explorador e a grade em destaque indica a vizinhança percebida pelo agente. Uma vez que haja a necessidade de movimentação do agente, o mapa T_{aux} , mostrado na Figura 5.14 (b), é consultado e as células vizinhas marcadas com o valor lógico 1 são identificadas como destinos possíveis.

Note que no exemplo da Figura 5.14 (a) estão sendo descartadas as células que estão marcadas com valor lógico 0 (zero). Em seguida, o mapa T é consultado para que dentre as células candidatas a destinos seja escolhida aquela que apresenta a maior utilidade de exploração para o agente transformador. Cada célula é representada por um número que descreve o nível de cinza da imagem naquele ponto, resultado da composição das variáveis proximais descritas no cálculo do mapa de utilidade. A célula que tiver o maior nível de cinza associado, dentro do raio de percepção do agente, será a célula para o qual o agente

irá movimentar-se. Desta forma, na nova interação, a célula selecionada passa a ser a nova área em exploração.

Um nível de coordenação entre os agentes é necessário para lidar com os conflitos que advêm do mecanismo de tomada de decisão. Como cada agente possui autonomia, decisões conflitantes podem ser tomadas e um tratamento especial faz-se necessário para esses casos. Por exemplo, é possível que a célula selecionada pelo mecanismo de decisão do agente *A* esteja sob ação de um outro agente *B* em determinado momento da simulação. O modelo não permite que dois agentes transformadores atuem no mesmo espaço ao mesmo tempo, portanto uma ação de coordenação deve ser tomada. Caso semelhante pode acontecer quando dois agentes *C* e *D* analisam a sua vizinhança e decidem movimentar-se para a mesma célula. A coordenação dos agentes é implementada computacionalmente pelo SMA na arquitetura em camadas apresentada na Figura 5.16 (ver Seção 5.3.1), além de ser definida por um conjunto de regras de comportamento de cada tipologia de agente transformador, regras que podem ser alteradas conforme políticas definidas (ver Tabela 5.2).

Para cada tipologia de agente transformador foi definido um conjunto de premissas e regras que definem o comportamento do agente. Quando um agente é instanciado sendo de alguma tipologia, ele assume os padrões de comportamento daquela tipologia. Tal conjunto de informações básicas para os agentes transformadores foram sintetizados a partir da literatura e do conhecimento de especialistas. A premissa básica adotada na modelagem do comportamento de todos os agentes pode ser definido em duas sentenças: (i) Todos os agentes competem pelo espaço; e (ii) Todos os agentes querem aumentar a sua área e taxa de transformação da terra. Entretanto, cada classe de agente possui orientações específicas, que são descritas a seguir.

*Agricultor*²

1. É o primeiro agente de transformação das áreas destinadas à pecuária. Portanto, áreas que deixaram de ser exploradas por agentes da tipologia pecuarista são prioritárias para essa tipologia, em relação às áreas urbanizadas e de vegetação remanescente;
2. Pode converter áreas de vegetação remanescente, uma vez que, dependendo de características físicas como topografia e localização, a área pode não ser adequada para pecuária, mas utilizável para agricultura;
3. Considera-se que uma área transformada por esse agente não retorna a ser vegetação natural. Aqui considera-se o tipo de agricultura clássica do Cerrado, no qual o agricultor destrói o sistema de raízes (afetando a maior parte da biomassa do bioma, que concentra-se no subsolo), inviabilizando, quase que por completo, a conversão da área;
4. PDOT - os agentes dessa tipologia possuem estímulo e subsídios para ocupação de áreas destinadas ao uso rural. Isso reflete no cálculo do mapa de utilidade para essa tipologia. Em outras áreas há o completo impedimento da atuação dessa tipologia como, por exemplo, os aglomerados urbanos.

²Está sendo considerada a agricultura de uma cultura genérica não definida. Existe um ciclo de sucessão agrícola que não é considerado para os propósitos da simulação.

Pecuarista

1. Geralmente é o primeiro agente de transformação da vegetação remanescente, ou seja, há a prioridade na transformação de vegetação remanescente para pecuária, quando comparado às demais tipologias de agentes;
2. Uma área que esteve sob ação de um agente pecuarista pode retornar ao estado de vegetação natural se a interrupção for suspensa por tempo suficiente, entretanto, uma taxa mínima consegue efetivar essa conversão;
3. Pode agir em uma área agricultável e mudar-lhe o estado (taxa ínfima);
4. PDOT - os agentes dessa tipologia possuem estímulo e subsídios para ocupação de áreas destinadas ao uso rural. Isso reflete no cálculo do mapa de utilidade para essa tipologia. Em outras áreas há o completo impedimento da atuação dessa tipologia como, por exemplo, os aglomerados urbanos.

Urbanizador

1. Qualquer área pode sofrer atuação do agente urbanizador, tanto as áreas remanescentes, quantos as áreas de agricultura, pecuária e conservação;
2. As células que sofrem a ação do agente não mudam de estado. É a regra comum que define que uma vez que o espaço se consolida como urbano, ele sempre será urbano;
3. Prevalece sobre as demais tipologias por ser a atividade de maior retorno econômico. Possui prioridade na competição;
4. Estimulador dos agentes de agricultura e pecuária. Parte-se do princípio que quanto maiores os centros urbanos, maior a demanda pela produção de alimentos;
5. PDOT - há sempre definida uma área urbana já consolidada e uma zona de expansão urbana. Tais áreas tem prioridade para a ação do agente. Entretanto, pode agir por todo o espaço.

Conservacionista

1. Modelado para agir em áreas de vegetação remanescente;
2. As células que deixam de estar sob a ação dessa classe de agentes podem transformar o seu estado para áreas de agricultura, pecuária ou urbanização;
3. Devem existir células sob a ação desses agentes, no mínimo, na razão de $\frac{1}{5}$ da soma das células sob ação dos agentes agricultores e pecuaristas. Essa regra visa simular os 20% da área de agricultura e pecuária deve ser destinada para Reserva Legal³ do Cerrado.

³[Área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, ressaltada a de preservação permanente (APP), representativa do ambiente natural da região e necessária ao uso sustentável dos recursos naturais, à conservação e reabilitação dos processos ecológicos, à conservação da biodiversidade e ao abrigo e proteção da fauna e flora nativas. Deve ser equivalente a, no mínimo, 20% (vinte por cento) da área total da propriedade. Sua implantação deve compatibilizar a conservação dos recursos naturais e o uso econômico da propriedade.

4. PDOT - é comum a definição de áreas prioritárias para a conservação.

As características apresentadas para o modelo são essenciais para o entendimento das decisões arquiteturais da ferramenta implementadas no protótipo. Alguns detalhes da implementação também esclarecem regras definidas no modelo, tornando clara a dependência entre o proposto no processo de modelagem e o que efetivamente será construído em *software*. A Seção 5.3 descreve as características gerais da ferramenta proposta, bem como todo o ferramental utilizado para a construção do protótipo.

5.3 Ferramenta MASE

O protótipo da ferramenta computacional implementa o modelo descrito na Seção 5.2, configurando as mudanças ocorridas no tempo por meio das variáveis definidas no modelo, bem como pela racionalidade atribuída a cada um dos agentes. Serão apresentadas as características fundamentais do protótipo, sua arquitetura e implementação, bem como a definição do SMA proposto conforme as orientações gerais da metodologia Prometheus (ver seção 3.2.5 45).

Devido a complexidade do trabalho em curso, é necessário a adoção de uma metodologia que auxilie a especificação dos elementos do *software*. A metodologia Prometheus, é uma metodologia que visa a clareza da enunciação do sistema e é reconhecida pela sua flexibilidade. Conforme preconiza a metodologia, a descrição da ferramenta MASE apresentará a Especificação do Sistema (definição do ambiente, objetivos, funcionalidades e dados externos), o Projeto de Arquitetura (organização, arquitetura, tipo dos agentes, comunicação e interação) e o Projeto Detalhado (descrição dos eventos internos). Ao decorrer deste Capítulo, essas diretrizes são apresentadas agrupadas, principalmente, na Seção 5.3.1 e seus subitens.

A ferramenta proposta pode ser sintetizada como um SMA híbrido de coordenação competitiva entre os agentes. Um SMA, por ser composto de vários agentes, os quais devem interagirem para alcançar um objetivo comum do projeto. A abordagem de interação adotada para os agentes foi definida como competitiva, uma vez que os agentes de uso da terra concorrem pelo mesmo recurso (o espaço), dentro do *grid* de simulação e podem ter objetivos distintos e concorrentes entre eles, mas consoantes com um objetivo global de utilização dos recursos disponíveis. A abordagem híbrida se refere à comunicação e interação dos agentes, permitindo uma abordagem multiescalar, como discutido na Seção 2.2.1 e apresentado na Figura 2.7. Importante não atribuir ao termo “multiescalar” à noção geográfica de escala. Nesse trabalho o termo refere-se à conjugação dos dois tipos de estruturas existentes nos modelos de uso e cobertura da terra: as hierarquias *bottom-up* e *top-down*. A proposta híbrida conjuga essas duas hierarquias, permitindo maior flexibilidade de análise no modelo de simulação, e representa considerável aumento na complexidade da arquitetura.

A solução proposta considera camadas (*layers*) arquiteturais para a simulação. A concepção da implementação contempla a definição do modelo conceitual, apresentada na Seção 5.2, que define agentes transformadores que conseguem movimentar-se pelo espaço (*grid*) e alterar o ambiente conforme o seu comportamento. Esses agentes são instanciados com comportamentos variáveis, conforme a tipologia determinada pelo usuário. A ferramenta instancia também os agentes espaciais, que representam o espaço em pesquisa

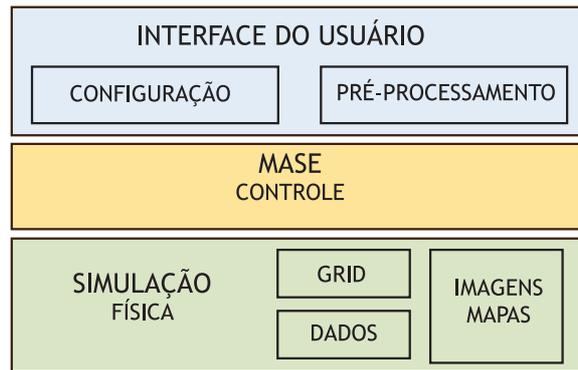


Figura 5.15: Arquitetura do Sistema MASE.

e seus atributos. Nas próximas seções são detalhadas as demais camadas de hierarquia de agentes, transparentes ao usuário. Além dos agentes, são consideradas para a simulação camadas de variáveis proximais e políticas, que explicam as influências regionais na configuração espacial dos padrões de mudança, por exemplo a distância às estradas, centros urbanos, hidrografia, PDOT, entre outros.

Para iniciar a descrição da ferramenta MASE, serão apresentados a descrição do SMA e implementação, seguido pelos *frameworks* de desenvolvimento e detalhes da infraestrutura computacional.

5.3.1 Especificação do Sistema e Projeto de Arquitetura

A arquitetura proposta neste trabalho consiste em uma ferramenta estratificada em três camadas, conforme apresentado na 5.15. O sistema interage com o usuário por meio de uma camada de apresentação, denominada camada de usuário, na qual o usuário informa as configurações básicas e as ações de pré-processamento são executadas. Na camada de controle reside a coordenação dos agentes do SMA. Na camada inferior, o nível físico, há a interação com o *grid* de simulação e com os conjuntos de dados e de mapas de saída, resultantes do processo de simulação.

Camada de Usuário

Na camada de usuário projetou-se interface que permitisse a configuração do modelo e visualização da simulação. É nessa camada que as configurações do modelo são fornecidas à ferramenta, de modo a guiar o funcionamento da ferramenta MASE. O pré-processamento é também derivado das definições do modelo informadas pelo usuário, de modo que o conjunto de imagens de entrada e regras esteja pronto para o início da simulação.

Em relação a configuração, alguns requisitos podem ser elicitados. O usuário configura a ferramenta conforme as decisões do modelo por ele definido. O princípio que rege a configuração é que o usuário tenha controle total sobre as configurações referentes ao modelo. Ele poderá configurar quais agentes farão parte da simulação, adicionando comportamentos a eles a partir de uma biblioteca disponível. Também é possível associar a informação de máquinas de estados, de modo a especificar as transições e processos de transformação permitidos para o processo. O usuário é responsável por informar a ferramenta todos os conjuntos de imagens e variáveis a serem utilizadas, de modo a representar as camadas

definidas no modelo conceitual. A flexibilidade da configuração estende-se à criação do número de agentes por tipologia, que interagirão no espaço definido pelo usuário. Os atributos de entrada podem ser assim sintetizados:

- Imagem da área de estudo (.bmp);
- Uma imagem por variável proximal (.bmp);
- Tipologias de agentes (ex.: agricultor, pecuarista etc);
- Número de agentes por tipologia;
- Comportamento por tipologia;
- Máquina de estados (uma FSM por simulação);

O pré-processamento é uma alternativa necessária ainda na primeira versão da ferramenta MASE. Para não sobrecarregar o sistema, e pela ausência da implementação de funcionalidades de manipulação, cálculo e renderização de imagens, há o pré-processamento dos dados externos (imagens) definidas pelo usuário. Atualmente o software Matlab é integrado à ferramenta MASE, ou seja, é necessária a instalação do Matlab para o correto funcionamento da ferramenta. Quando o usuário informa o conjunto de imagens, a MASE faz requisições ao Matlab, que processa essas imagens e retorna os resultados para a MASE. O Matlab foi escolhido por ser *software* referência para cálculos com imagens e por disponibilizar extensa lista de funções, permitindo também a criação de *scripts* para tratamentos personalizados.

Camada de Controle

A camada de controle se utiliza das regras e configurações definidas previamente para produzir a simulação. É nessa camada que está organizado o SMA, seus mecanismos de comunicação, organização e planejamento. Serão descritas a composição hierárquica do SMA proposto, bem como o PEAS de cada um dos agentes.

Camada Física

A camada física representa a simulação propriamente dita, o resultado das ações da camada de controle são refletidas na alteração dos mapas de espaço físico. É a camada que apresenta os efeitos, permitindo o acompanhamento da simulação. A visualização da simulação pode se dar pela interface do *software*, por meio de transformações no mapa mostrado na tela no decorrer do tempo de simulação, ou pela produção de imagens durante a simulação, que registram o estado do ambiente sob ação dos agentes transformadores ao longo dos *steps* e podem ser analisadas posteriormente. É possível, por exemplo, determinar que uma imagem será gerada a cada quatro *steps*, ou um mês no tempo de simulação.

Organização

Para administrar a coordenação dos agentes, a cooperação e a resolução de conflitos, optou-se por uma organização em níveis hierárquicos. Esse tipo de organização visa

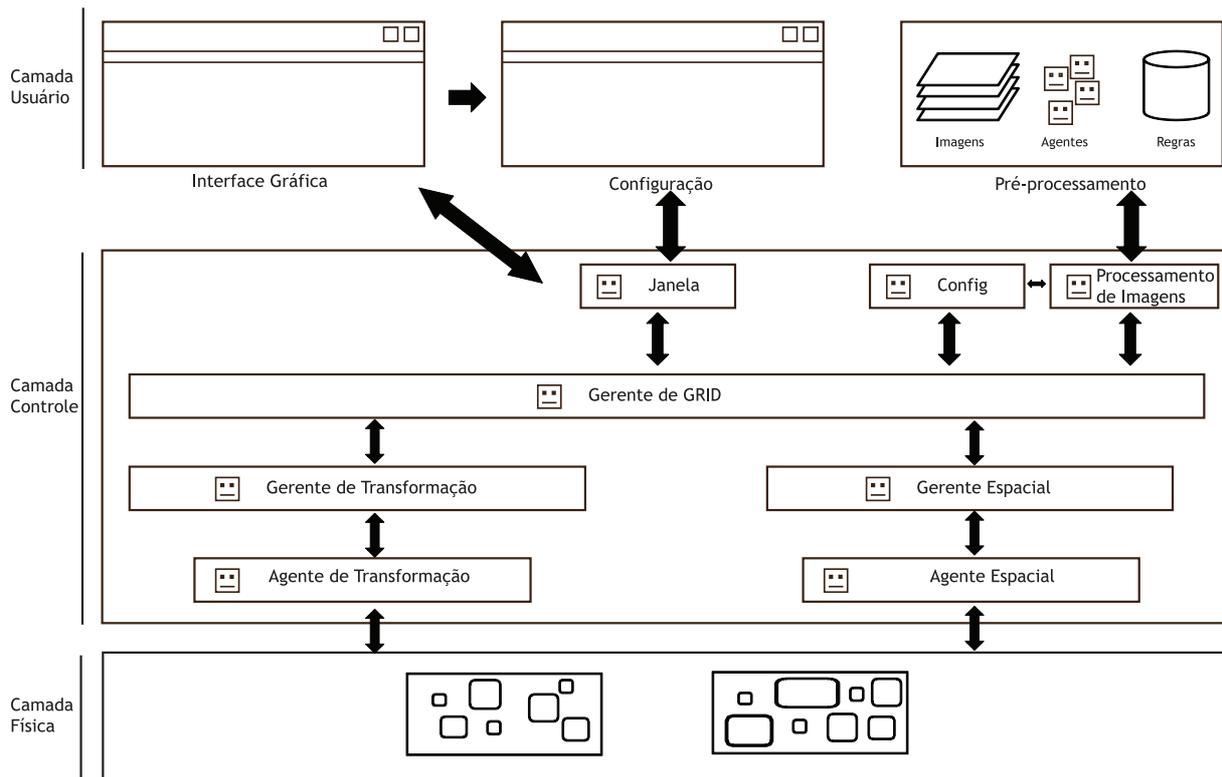


Figura 5.16: Organização em níveis do Sistema MASE.

dar maior estabilidade ao SMA, simplificando a coordenação dos agentes, a distribuição dos recursos e a resolução de conflitos. A organização interna do SMA é ilustrada na Figura 5.16.

O nível mais baixo, chamado operacional, é composto apenas pelos agentes que realizam atividades associadas à representação do espaço ou à transformação do espaço, os agentes transformadores e espaciais. No nível imediatamente superior, chamado de gerência local, é realizado o planejamento e coordenação das atividades dos agentes do nível operacional. Do mesmo modo, o topo da hierarquia dos agentes, ou gerência global, coordena os agentes do nível abaixo. Os agentes responsáveis pelas atividades de planejamento e coordenação são genericamente denominados gerentes (Gerentes de Transformação e Espacial no nível local e Gerente de GRID no nível global). Respondem diretamente à camada de gerência global um conjunto de agentes de serviço (Janela, Config e Processamento de Imagens), com atividades exclusivas de repassar os parâmetros da simulação para o conhecimento da gerência global. Com essa organização, busca-se obter um sistema escalável, que possa tratar do caso mais simples onde há apenas uma instância de agente operacional, até o caso mais complexo de competição por recursos, implementado no estudo de caso.

Antes da especificação de cada uma das classes de agente que compõem as camadas organizacionais do SMA, é necessário especificar qual é o ambiente desse sistema, informação fundamental que determina o substrato onde os agentes irão atuar, conforme discutido na seção 3.2.1. Na sequência será descrito os elementos que fundamentam o SMA desenvolvido segundo conceitos definidos na Seção 3.2.

Ambiente

O ambiente, para um sistema multiagente que representa a dinâmica do uso e cobertura da terra, pode ser considerado como uma leitura computacional no ambiente físico real. Quanto mais dinâmico o ambiente, maior será a complexidade dos agentes. Embora o ambiente real, ou seja, o espaço geográfico sobre o qual acontecem as alterações da cobertura e uso da terra, seja parcialmente observável, estocástico, sequencial, dinâmico, contínuo, multiagente e competitivo, várias restrições são feitas para que o ambiente real se torne computável para a simulação. Para o estudo de caso em pauta, o ambiente é descrito conforme caracterização proposta por [Russel e Norvig \(2010\)](#), sendo descrito pelas seguintes características:

- Parcialmente Observável - cada agente tem campo de percepção restrito à sua vizinhança;
- Determinístico - o próximo estado do ambiente é determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente;
- Episódico - o tempo não é tratado de maneira contínua. São considerados passos atômicos para fins da simulação (*time steps*);
- Estático - o ambiente não se altera enquanto um agente está deliberando;
- Discreto - restringe as transições possíveis às definidas pela máquina de estados *FSM*;
- Multiagente - é necessário um conjunto de agentes, com papéis diversos, para compor o sistema;
- Competitivo - agentes possuem interesses próprios e concorrem pelos recursos existentes no *grid*.

O ambiente simulável é consideravelmente menos complexo que o ambiente real, entretanto, essas adaptações são muitas vezes inevitáveis. Alguns avanços na complexidade do ambiente são propostas na seção [7.1](#).

Agentes

Para a definição arquitetural da ferramenta foram propostas classes de agentes distintas, delimitando entidades responsáveis pela coordenação, pela prestação de serviços e pela execução da simulação propriamente dita. A estrutura do SMA é composta de seis classes de agentes: Gerente de GRID, Gerente Espacial, Gerente Transformador, Agente Transformador, Agente Espacial, Agente Janela, Agente Processamento de Imagens e Agente de Configuração.

As classes de agente distribuem-se pela arquitetura, sendo que na camada Usuário age o Agente Janela, na camada Controle atuam os Gerente de GRID, Gerente Espacial, Gerente Transformador, Agente Processamento de Imagens e Agente Configuração, e finalmente na camada Física, o Agente Transformador e o Agente Espacial. Em linhas gerais, o Agente Janela é um *listener* responsável pela interface gráfica, que permanece



Figura 5.17: Detalhamento dos tipos implementados para as classes de agentes genéricos operacionais.

em contato com o usuário e percebe quando o usuário termina de efetuar as configurações (que estão sob responsabilidade do Agente de Configuração) e informa que ao Gerente de GRID que já é possível iniciar o pré-processamento, a cargo do Agente Processamento de Imagens (implementado como Agente Matlab). O Gerente de GRID é o núcleo de toda a ferramenta, sendo responsável por promover a conversão de requisições, ativar agentes e enviar ordens. Os Gerentes Transformador e Espacial realizam o que o GGRID faz, só que numa escala local: coordenam a atuação dos Agentes Transformadores e Espaciais.

Salienta-se que estas classes são o arcabouço geral, mas que podem ser expandidas, ou novas instâncias das mesmas classes podem ser criadas, à medida da necessidade do modelo. Por exemplo, para a implementação do modelo descrito na Seção 5.2, algumas especificidades eram necessárias para captar os diferentes tipos de uso da terra. A abordagem de desenvolvimento de SMA é incremental, facilitando o desenvolvimento de novas funcionalidades nos agentes. A classe “Agente de Transformação”, que pode ser visualizada na Figura 5.16 é uma classe genérica de agente operacional, que pode ser instanciada com atributos e características distintas. O mesmo poderia acontecer com a classe “Agente Espacial”, para mapear diferentes configurações no espaço. Para o modelo MASE, somente o agente espacial Célula foi desenvolvido. Os detalhes da implementação dessa classe de agente genérico são apresentados na Figura 5.17 e nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Com a especificidade requerida pelo modelo, as seis classes de agentes foram estruturadas em três tipos básicos de programas de agente (ver Seção 3.1):

1. **Reativo Simples** - Agentes de Serviço (Processamento de Imagem, Config e Janela);
2. **Reativo com Registro de Estado** - Agentes Transformadores e Agentes Espaciais;
3. **Orientado a Objetivo** - Gerente de GRID, Gerente Espacial, Gerente de Transformação.

A implementação dos Agentes de Serviço segue o programa reativo simples. Esse é o tipo mais simples de programa de agente, pois sua ação depende unicamente da percepção atual. O pseudocódigo a seguir apresenta a lógica básica implementada para essa classe de agentes, conforme definido por Russel e Norvig (2010).

```
função AGENTE-REFLEXIVO-SIMPLES (percepção) retorna ação
static regras, um conjunto de regras de produção
```

```
estado<- INTERPRETA-ENTRADA(percepção)
regra<- COLECAO-REGRAS (estado, regras)
```

```
ação <- EXECUTA-ACAO[regra]
```

```
retorna ação
```

Tanto os Agentes Transformadores (Agricultor, Pecuarista, Urbanizador e Conservacionista) quanto o Agente Espacial (Célula) apresentam um programa reflexivo com registro de estado (ver Figura 3.1). Esse programa é utilizado quando o ambiente não é completamente observável, e portanto é necessário que os agentes armazenem um estado interno que reflita, ao menos em parte, a porção do mundo que não é observável. Em suma, são agentes simples que percebem e agem no ambiente, mas cujas ações dependem de um histórico de suas percepções, bem como um conjunto de comportamentos pré-definidos. Os Agentes Espaciais, por exemplo, armazenam atributos como o potencial da célula, e utilizam essa informação para guiar suas ações e manter seus gerentes informados. O pseudocódigo geral desse tipo de programa é apresentado a seguir.

```
função AGENTE-REFLEXIVO-COM-REGISTRO-DE-ESTADO retorna ação  
static estado, uma descrição do estado do ambiente  
regras, um conjunto de regras de produção  
ação, a última ação executada, inicialmente nenhuma
```

```
estado<- ATUALIZA-ESTADO(estado, ação, percepção)  
regra<- COLECAO-REGRAS (estado, regras)  
ação <- EXECUTA-ACAO[regra]
```

```
retorna ação
```

Os agentes em um nível hierárquico superior, que coordenam e planejam um grupo de agentes e suas ações, possuem programa de agente mais complexo, sendo agentes com programas orientados a objetivo. Basicamente, em determinadas situações, é necessário que o agente tenha informações que descrevam qual é a situação desejada, ou qual é o objetivo que precisa alcançar. Programas com essa característica tendem a ser mais flexíveis pois o conhecimento que apoia as decisões do agente é explícito e pode ser modificado.

Além do programa do agente, para a caracterização do SMA é necessário definir o número de instâncias de cada agente, bem como quais são as suas percepções e ações. A seguir, as Tabelas 5.4 e 5.5 detalham as características gerais de cada um dos agentes. Basicamente, o conjunto de percepções e ações está agrupado na tabela sob o termo função. As percepções são, prioritariamente, àquelas que fornecem insumos para o agente, como receber ordens de um gerente, ou uma requisição de algum outro tipo de agente. Já as ações configuram o comportamento dos agentes, incluindo a troca de mensagens entre eles (comunicação) e a manipulação dos seus atributos e estados internos.

As duas classes de agentes finalísticos, ou seja, aqueles que desempenham as funções centrais na descrição da dinâmica de simulação das mudanças no uso e na cobertura da terra são os Agentes de Transformação e Espacial. São esses dois tipos de agente que formam a base da hierarquia *bottom-up* da ferramenta de simulação proposta (ver Figura 5.4). Esses agentes operacionais são os que possuem seu comportamento detalhadamente descrito no modelo (ver Seção 5.2). Para o usuário final, só é visível a ação dessas entidades. Toda a arquitetura, coordenação e comunicação necessária para que a ação desses

agentes é o que caracteriza um SMA e o diferencia de outras aplicações baseada em conjunto de regras ou matrizes de probabilidade definidas pelo usuário. Toda a complexidade subjacente, que é encapsulada pela ferramenta, permite que o usuário concentre-se apenas nas características relevantes do modelo.

Tabela 5.4: Descrição das Classes de Agentes Gerentes com o comportamento.

Classe de Agente	Tipo	Qtde Instâncias	Funções
Gerente de GRID (GGRID)	Orientado a Objetivo	1	<p>Instancia Controle do Matlab, Agente de Configuração e Janela</p> <p>Detém os recursos comuns, os organiza e promove distribuição</p> <p>Controla o tempo da simulação</p> <p>Recebe e envia mensagens de sinalização de começo e fim de simulação</p> <p>Percebe se o teste de política está ativo na simulação</p> <p>Abre e fecha os steps da simulação</p> <p>Ao fim da simulação, envia ao Controle do Matlab os recursos para serem representados em imagens</p>
Gerente Espacial (GE)	Orientado a Objetivo	1	<p>Gerencia estados das células (máquina de estados - FSM)</p> <p>Desbloqueia as células</p> <p>Gerencia e exploração / regeneração</p> <p>Atualiza matriz auxiliar do mapa de utilidade</p> <p>Oferta espaços para a ação do Agente Transformador</p> <p>Recebe ordens e replica erros e informações para o GGRID</p>
Gerente de Transformação (GT)	Orientado a Objetivo	1	<p>Instancia Agentes Transformadores, conforme os parâmetros do <i>ConfigAgent</i></p> <p>Inicia o mapa de utilidade e aloca os Agentes Transformadores</p> <p>Controla a simulação e remaneja os agentes para áreas de maior utilidade</p> <p>Avalia áreas em oferta para cálculo da próxima posição provável (PPP)</p> <p>Considera regras da simulação no cálculo da PPP</p> <p>Recebe ordens e replica erros e informações para GGRID</p>

Tabela 5.5: Descrição das Classes de Agentes de Serviço e Agentes Operacionais com o comportamento.

Classe de Agente	Tipo	Qtde Instâncias	Funções
Agente de Configuração <i>ConfigAgent</i>	Reativo	1	Recebe ordens do GGRID Envia confirmação de execução de tarefa (sinaliza o início da simulação) Envia imagens para o Controle do Matlab ler Configura os agentes, instanciando os Gerente de Célula e Gerente de Transformação
Controle de Matlab Janela	Reativo	1	Conecta-se ao Matlab Executa requisições recebidas e devolve a resposta ao remetente Promove visualização do <i>software</i> Atualiza-se ao final de cada <i>step</i>
Agente Espacial <i>Célula</i>	Reflexivo com registro de estado	Definido pelo usuário	Recebe ordens do GE Informa o seu estado para o GE Começa ou interrompe a regeneração da vegetação Armazena o quanto da vegetação já foi explorada Sinaliza se está ou não ocupado por um Agente Transformador
Agente Transformador <i>Agricultor,</i> <i>Pecuarista,</i> <i>Urbanizador e</i> <i>Conservacionista</i>	Reflexivo com registro de estado	Definido pelo usuário	Recebe ordens do GT Informa o seu estado para o GT Solicita alteração de posição para o GT Movimenta-se pelo espaço (troca de célula) Explora/Recupera a célula Identifica se a célula já está exaurida

Comunicação e Interação

A comunicação entre agentes segue a hierarquia de sua organização, ou seja, um agente só se comunica com seu agente imediato e um gerente só se comunica com seu gerente superior. Uma das vantagens dessa restrição é a facilidade de controle e a clareza de quem são os interlocutores. A Figura 5.18 apresenta o diagrama com as interações entre os agentes. Em um SMA, a interação dos agentes acontece, basicamente, por troca de mensagens. Todo o *framework* e protocolos de interação e comunicação entre os agentes são fornecidos pelo JADE por meio da linguagem FIPA ACL (ver Seção 3.3.2).

Nota-se que o Gerente de GRID tem maior abrangência de comunicação, uma vez que é o responsável pela simulação como um todo. Outro agente que também possui intensa interação com os demais é o Agente de Configuração, uma vez que é ele quem repassa os parâmetros definidos pelo usuário aos demais agentes. No diagrama, as linhas representam a interface entre os agentes, enquanto as setas apresentam o sentido da comunicação.

Para facilidade de comunicação, os Gerentes têm mapeados os AID (Identificador do Agente) dos seus subordinados, que contém o endereço de cada um deles. De modo análogo, todos os agentes subordinados já são instanciados conhecendo o AID de seus superiores. Para agilizar o processo de comunicação, o Gerente de GRID, o Agente Janela, o Agente Matlab e o Agente de Configuração possuem seus AID registrados do DF (Facilitador de Diretórios). Conforme explicitado na Seção 3.3.2, o DF é um mecanismo de páginas amarelas provido pelo JADE, que permite o registro de agentes que desejam ter seus serviços disponibilizados, de modo que sejam mais facilmente encontrados.

O JADE fornece reais facilidades para a implementação e gerência da comunicação. Pelo grande número de agentes envolvidos na simulação, a intensa troca de mensagens pode causar considerável sobrecarga ao sistema. Para mitigar esse problema, a implementação de troca de mensagens foi amplamente reduzida. Grande mensagens e objetos só são passados em casos de extrema necessidade. Nos casos em que mensagens curtas são necessárias, essas são tratadas de modo a serem o mais explícitas possível, já indicando, no próprio assunto da mensagem, informações suficientes para que o remetente saiba o que fazer. As mensagens implementadas com o objetivo de acelerar o entendimento pelo remete, são apresentadas no subs trato de código a seguir.

```
public abstract class ACLPerfomativeDefinitions
{

public static final int MATLAB_CONECTADO = 0x1001;

public static final int REQUISICAO_MATLAB = 0x1002;
public static final int REQUISICAO_MATLAB_ESCRITA = 0x1008;

public static final int COMECAR_SIMULACAO = 0x1003;
public static final int LER_IMAGENS_RES = 0x1004;
public static final int IMAGEM_LIDA = 0x1005;
public static final int AGRICULTORES_PRONTOS = 0x1006;
public static final int CELULAS_PRONTAS = 0x1007;

}
```

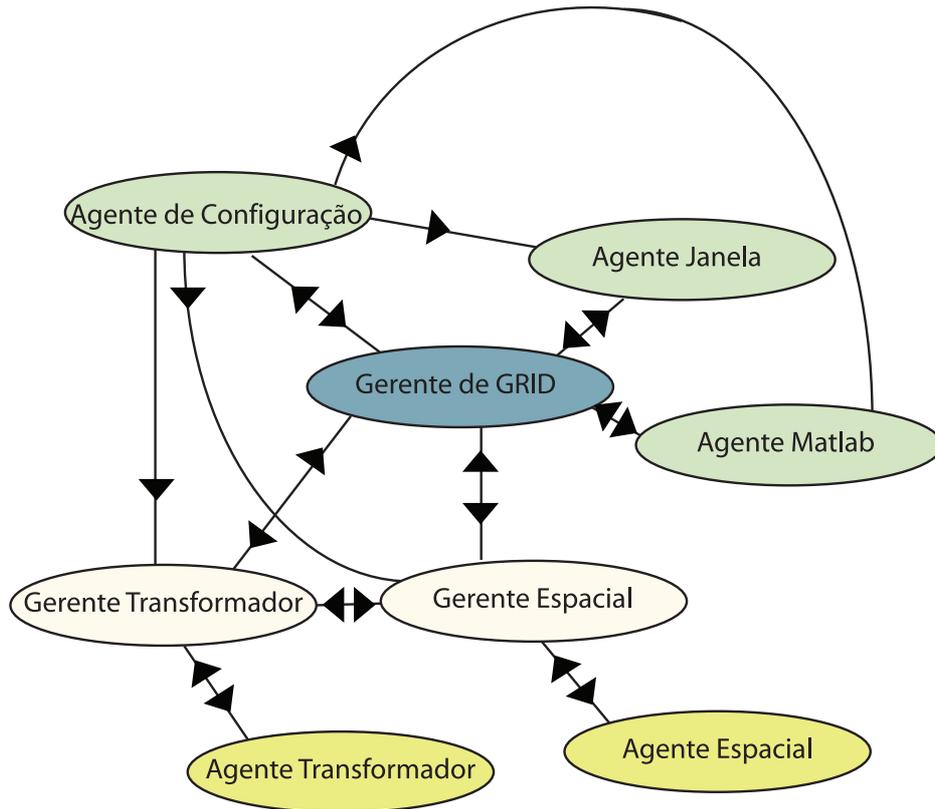


Figura 5.18: Diagrama de interação/comunicação entre os agentes.

Esses assuntos, denominados pelo JADE como *performativas*, devem ser do tipo inteiro porque o tratamento é feito por meio de estruturas *switch*, que não compilam se a variável comparada não for absoluta. Essa estrutura está dentro de uma regra pré-determinada pelo JADE. Em suma, ao receber uma mensagem verifica-se se ela não é nula. Em seguida, compara-se um a um todos os assuntos da mensagem. A implementação é mostrada no código a seguir. O caso *default* é sempre colocar a mensagem de volta à pilha, para o caso de seu tratamento estar implementado em alguma outra regra.

```

if (m !=null) {

int performative=m.getPerformative();
switch (performative) {

case ACLPerformativeDefinitions.MATLAB_CONECTADO:
System.out.println("conectado matlab, chamando janela");
myAgent.addBehaviour (new IniciarAgenteJanela());
break;

case ACLPerformativeDefinitions.REQUISICAO_MATLAB:
System.out.println("recebendo requisicao matlab");
((MATLABControl)myAgent).autorizar(m.getContent(),m.getSender());
break;

```

```

case ACLPerformativeDefinitions.COMEÇAR_SIMULACAO:
System.out.println("Começar simulação");
myAgent.addBehaviour (new ComeçarSimulacao());
break;

case ACLPerformativeDefinitions.LER_IMAGENS_RES:
myAgent.addBehaviour (new LerImagens());
break;

case ACLPerformativeDefinitions.IMAGEM_LIDA:
System.out.println("Imagem lida");
myAgent.putBack(m);
break;

case ACLPerformativeDefinitions.CELULAS_PRONTAS:
System.out.println("Células prontas");
Step.celulas_prontas=true;
break;

case ACLPerformativeDefinitions.AGRICULTORES_PRONTOS:
System.out.println("Agricultores prontos");
Step.agricultores_prontos=true;
break;

default:
myAgent.putBack(m); //outros propósitos

}
m=null;

}

```

Ciclo de Execução do SMA

A definição do ciclo de execução do SMA equivale à fase de Detalhamento do Projeto da metodologia Prometheus. Nela, define-se os detalhes de cada agente e os eventos internos que foram implementados na ferramenta. O *software* é lançado a partir da classe **Boot** do JADE, colocando-se o Gerente de GRID no contêiner principal de agentes. Ele então dá início aos Agente Matlab e Janela. Em seguida, o Agente Matlab inicia o *software* Matlab e espera o *proxy* entre o Java e a ferramenta MASE. Quando esse é obtido, O GGRID informa o Agente Janela que há permissão para exibir a interface gráfica (Figura 5.19)

Após a visualização da interface, a utilização da ferramenta MASE inicia-se pela etapa de configuração e parametrização do modelo a ser simulado (MENU - CONFIGURAR). Atualmente, as configurações são atribuídas diretamente por variáveis no programa (*hard-coded*), entretanto o projeto e concepção de uma ferramenta integrada de configuração,

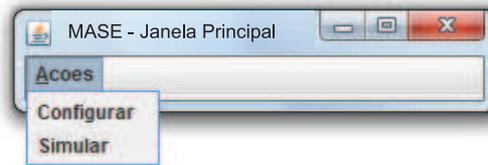


Figura 5.19: Janela Principal da Ferramenta MASE.

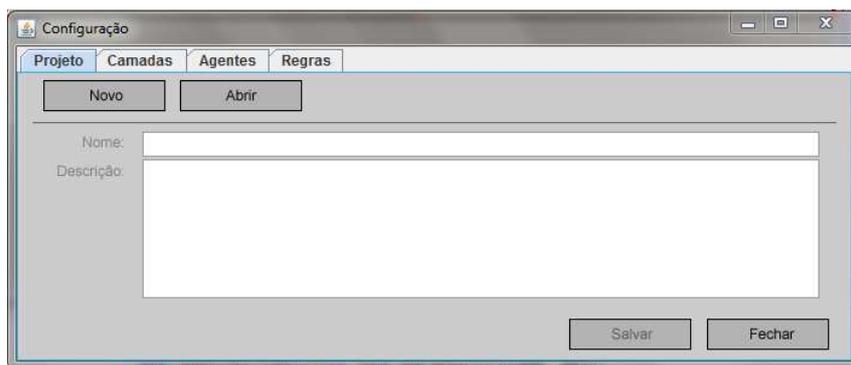
para permitir a entrada dessas mesmas informações em alto nível, já estará disponível em versões futuras da ferramenta. A interface com usuário se dará pela tela do *software*, com abas que designam as informações do Projeto, Camadas, Agentes e Regras, conforme ilustrado na Figura 5.20.

Dentro de Projeto é possível criá-lo ou abrir um projeto já existente, nomeá-lo e fornecer uma descrição geral. Na aba Camadas, há a entrada dos dados externos (*input*) à ferramenta, ou seja, o conjunto de imagens e o tratamento que será dado para cada uma delas (por exemplo, o filtro apresentado na Seção 5.2.2). Em Agentes é possível estipular as tipologias dos agentes genéricos, criando novos tipos, definindo o número de instâncias e atributos. Em Regras é permitido a definição dos comportamentos dos agentes e definição da máquina de estados FSM. Toda a visualização da ferramenta é responsabilidade do Agente Janela, que trabalha sob orientação do Gerente de GRID.

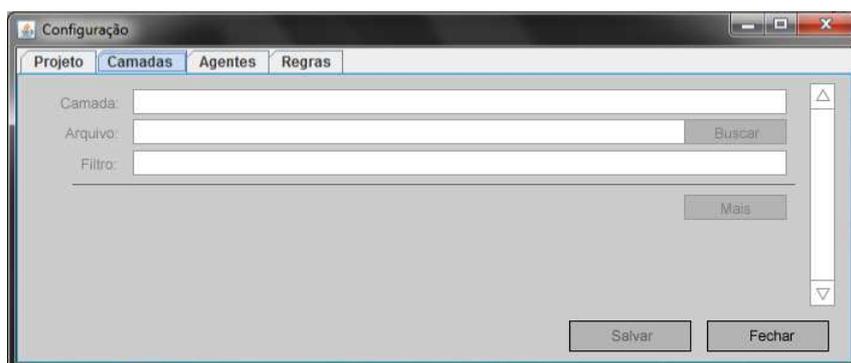
Após o término da fase de configuração, o usuário aciona o início da simulação (MENU - SIMULAR), o que faz com que o Agente Janela avise para o Gerente de GRID que é possível dar início a uma fase que é transparente ao usuário, denominada pré-processamento. A opção pela etapa de pré-processamento visa não onerar ainda mais a simulação, uma vez que as atividades aqui desempenhadas são de grande esforço computacional. O Agente de Configuração começa a executar suas ações em uma sequência de operações, a saber:

1. Escreve as configurações em disco;
2. Aciona o Agente Matlab para executar as transformações nas imagens, caso necessário. Aguarda o resultado e disponibiliza para o Gerente de GRID em *buffer*;
3. Após receber todas as respostas às requisições enviadas ao *software* Matlab, instancia o Gerente Transformador e o Gerente Espacial, repassando as regras pertinentes a cada um;
4. Aguarda a resposta dos gerentes para fornecer algum insumo adicional, se existir;
5. Quando todos os gerentes se declaram prontos, aciona o Agente Janela com a mensagem de finalização;
6. Entra em estado de bloqueio.

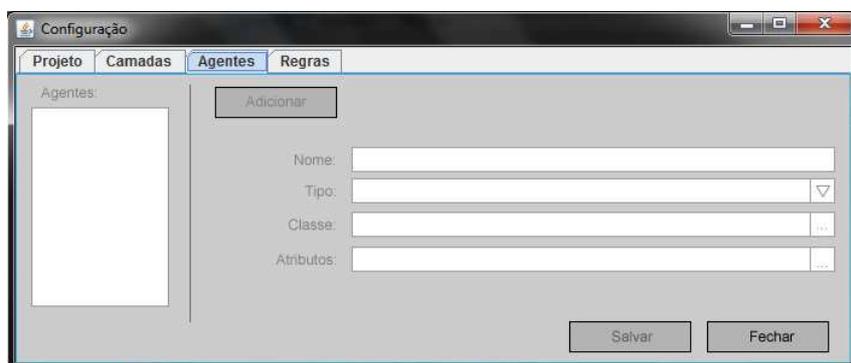
O Gerente de Transformação e o Gerente Espacial instanciam seus subordinados todos em bloqueio. Ao término, eles avisam ao Gerente GRID e o pré-processamento termina. O Gerente de GRID mantém uma lista indexada para guardar todos os resultados do pré-processamento, como um *buffer*, de modo a fornecer mecanismos de acesso a qualquer agente que necessite consultar essas informações. Quando da finalização do pré-processamento, dá-se início a simulação propriamente dita. A janela gráfica passa a



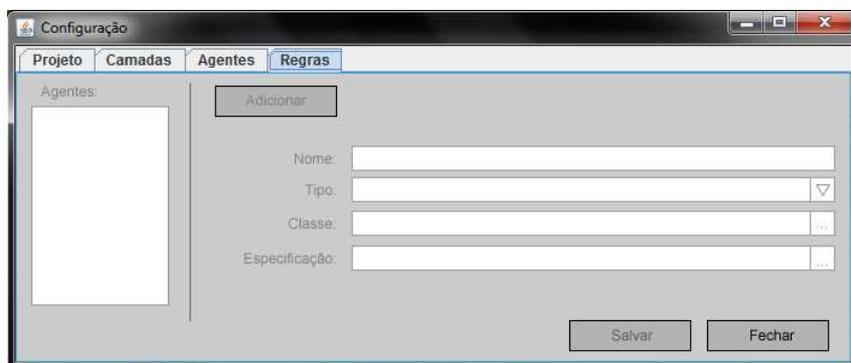
(a) Aba Projeto



(b) Aba Camadas



(c) Aba Agentes



(d) Aba Regras

Figura 5.20: Proposta de Interface de Configuração da Ferramenta MASE.

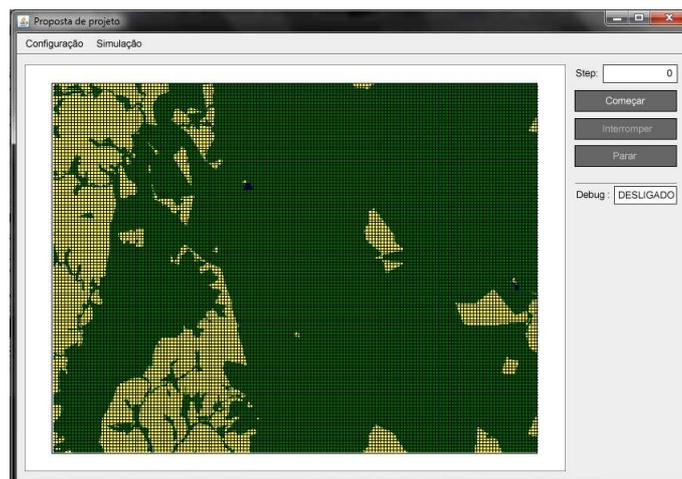


Figura 5.21: Projeto de Janela de Simulação, com os comandos de controle dispostos à direita.

exibir para o usuário o número de *steps* decorridos, e os botões de início, interrupção e parada, conforme Projeto Gráfico ilustrado na Figura 5.21

O GGRID então inicia os *steps*. Na abertura do *step*, os agentes transformadores são acordados pelo Gerente de Transformação. Eles transformam as células (explorar ou regenerar) e avisam de volta ao Gerente. Quando os gerentes locais recebem a confirmação de término de todos os agentes subordinados, encaminham uma mensagem ao GGRID informando que é possível encerrar o *step*. Se, durante um *step*, o mecanismo de decisão de alguma instância do Agente Transformador verifique que ele deve se mover pelo *grid*, este comunica o Gerente de Transformação, que por sua vez analisa o mapa de utilidade da vizinhança e requisita ao Gerente Espacial a alocação do Agente Transformador no próximo lugar provável. O *step* não é fechado enquanto não há a resposta do Gerente Espacial e a Realocação do agente.

Quando um *step* é finalizado, o GGRID avisa o Agente Janela para atualizar o mapa resultante na tela do usuário, fechando assim um ciclo de execução. Essa tarefa pode ser executada em paralelo com a abertura de um novo *step*, portanto o GGRID dispara, em paralelo, a requisição de atualização de janela e a autorização de execução de *step* para os gerentes. Todo o processo de renderização e simulação é demandante de grandes recursos computacionais. Para tentar amenizar a carga proveniente da simulação, os Agentes Espaciais, ou células, que são infinitamente em maior número, não são todos despertados em todos os *steps*. A implementação mantém as células bloqueadas até que um Agente Transformador demonstre interesse em movimentar-se para lá ou até que as células sejam classificadas como as de maior função de utilidade da vizinhança. Com esse mecanismo, a simulação começa notoriamente mais leve do que se todas as *threads* dos agentes espaciais, utilizados ou não naquele *step* de simulação, fossem executados ao mesmo tempo.

O ciclo de execução irá acontecer reiteradas vezes, até que o tempo total de simulação, definido pelo usuário, seja atingido ou até que o usuário interrompa o processo. Quando da ocorrência de qualquer um desses dois eventos, os próximos *steps* são imediatamente suspensos e o GGRID avisa todos os gerentes, que contactam os seus subordinados, ocasionando a parada total da simulação.

Outras atividades acontecem mais espaçadas ao longo da simulação. Por configuração

default (mas que pode ser alterada pelo usuário), o GGRID requisita ao Agente Matlab a criação de uma matriz que represente o estado do mapa da simulação com o estado do mapa. Essa matriz, quando do fim da simulação, pode ser processada (novamente sob tutela do Agente Matlab) de modo que um conjunto de imagens que descrevem o decorrer da simulação, seja gerado.

Implementação

Todos os agentes do SMA são descendentes diretos da classe `jade.core.Agent`, provida pela plataforma JADE. A Figura 5.23 apresenta um diagrama de Classes contendo os agentes implementados no SMA. A Figura 5.22 apresenta como as classes foram estruturadas no programa. Cada um dos níveis da hierarquia possui um ou mais agentes, descritos pelas seguintes classes no pacote `agents`:

- `GRID.java`
- `GerenteTransformacao.java`
- `GerenteCelula.java`
- `Agricultor.java`
- `Pecuarista.java`
- `Celula.java`
- `ConfigAgent.java`
- `Janela.java`
- `MATLABControl.java`

Seguindo as diretrizes do modelo descrito na Seção 5.2, o Agente Transformador foi implementado nos tipos `Agricultor` e `Pecuarista`, enquanto o Agente Espacial foi implementado sendo do tipo `Célula`. Ao herdar a classe `jade.core.Agent`, os agentes já possuem um conjunto de operações básicas definidas pelo próprio JADE, como registro no DF, configuração de métodos para implementação de comportamentos pré-definidos, como por exemplo a troca de mensagens.

Cada agente pode implementar um rol de comportamentos, denominados no JADE como *behaviours*. Um comportamento é uma ação com um objetivo específico, descritos pelas seguintes classes no pacote `behaviour`:

- `AdicionarAgentes.java`
- `AdicionarAgentesemBloqueio.java`
- `AutorizarAgentes.java`
- `ComecarSimulacao.java`
- `ConfigurarAgentesTransformadores.java`
- `ConfigurarCelulas.java`

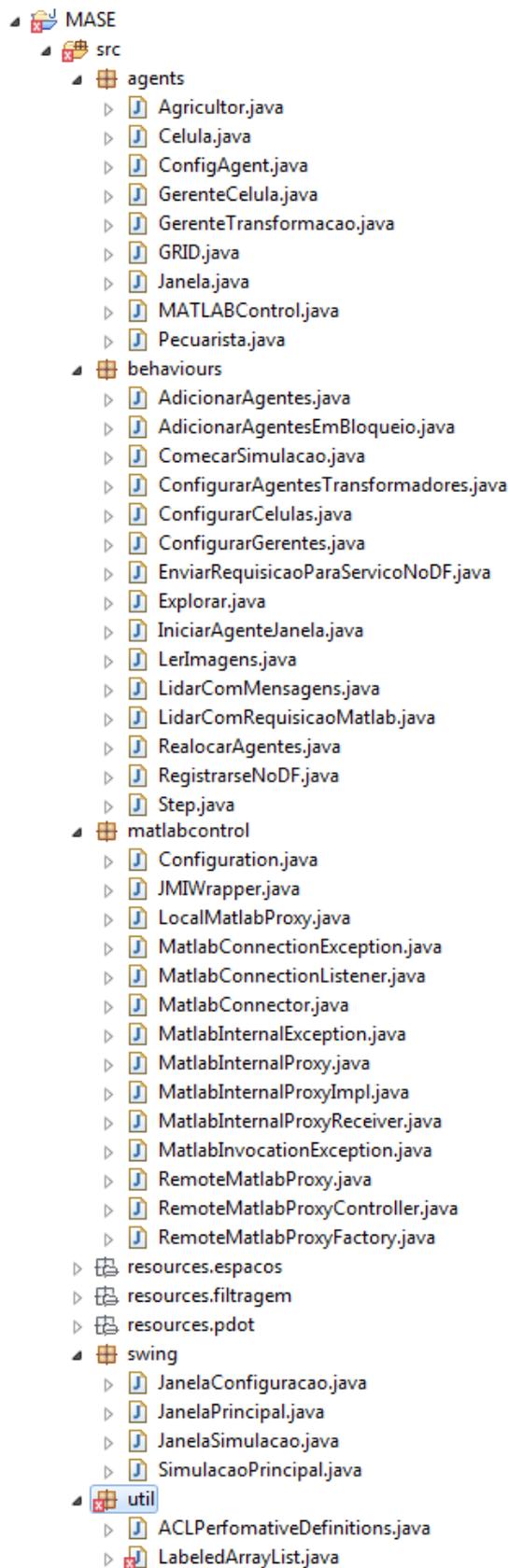


Figura 5.22: Classes implementadas da ferramenta MASE (Versão 1.0).

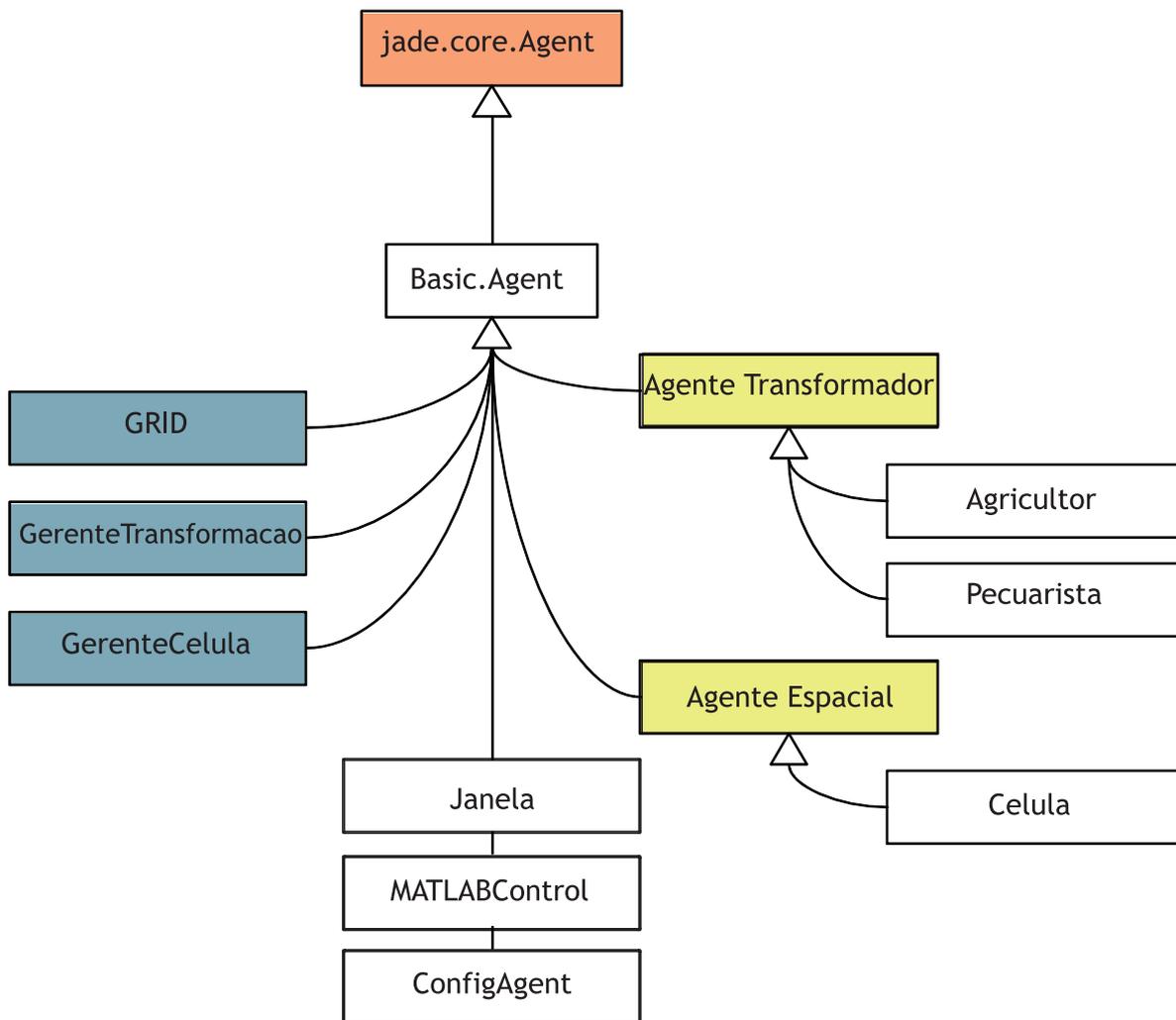


Figura 5.23: Diagrama de classes dos agentes no MASE.

- `ConfigurarGerentes.java`
- `EnviarRequisicaoParaServicoNoDF.java`
- `Explorar.java`
- `IniciarAgenteJanela.java`
- `LerImagens.java`
- `LidarComMensagens.java`
- `LidarComRequisicaoMatlab.java`
- `RealocarAgentes.java`
- `RegistrarseNoDF.java`
- `Step.java`

O código que implementa um comportamento também usufrui da estrutura oferecida pelo *framework* JADE. Obrigatoriamente, a classe que implementa o comportamento deve herdar as funcionalidades da classe `jade.core.behaviours.Behaviour`. Para determinar que uma classe de agente possui um dado comportamento, é necessário invocar na classe do agente o método `addBehaviour`, pertencente a classe `Agent`. Dessa maneira é possível implementar comportamentos genéricos ou específicos, que podem ser invocados por um ou muitos agentes. Independente do comportamento, é obrigatório que ele possua dois métodos, também definidos pelo JADE:

1. `action()`: descreve as ações a serem executadas que caracterizam o comportamento;
2. `done()`: retorna um valor booleano, indicando se o comportamento foi finalizado ou não.

No projeto da ferramenta MASE optou-se por implementar uma comportamentos JADE pré-definidos, ou seja, que já possuem alguns métodos de interesse desenvolvidos, mas que fornecem a liberdade de especificar os comportamentos. Esse tipo de auxílio é útil na construção de SMA. São quatro os comportamentos pré-definidos do JADE, entretanto a ferramenta MASE utiliza apenas dois, conforme ilustrado na Tabela 5.6:

One-Shot Behaviour - esse tipo de comportamento modela eventos que se executam de maneira quase instantânea e apenas uma vez;

Cyclic Behaviour - são comportamentos que nunca finalizam. O método `action()` desta classe de comportamentos é sempre executado pois o método `done()` sempre retorna `false`.

5.3.2 Detalhamento da Infraestrutura Computacional

Para o desenvolvimento do SMA híbrido foi utilizado o *Java Agent Development Framework* (JADE), versão 4.0 (20/04/2010), (Seção 3.3.2. O JADE implementa os padrões da FIPA para definição de um SMA e foi desenvolvido pela TILAB. O JADE é um *middleware* para desenvolvimento e execução de aplicações baseadas em agentes inteligentes,

Tabela 5.6: Classificação dos comportamentos implementados na ferramenta MASE conforme estrutura JADE.

Tipo de Comportamento		
OneShotBehaviour	CyclicBehaviour	Behaviour
AdicionarAgentes	AutorizarAgentes	LerImagens
AdicionarAgentesemBloqueio	Explorar	
ComecarSimulacao	LidarComMensagens	
ConfigurarAgentesTransformadores	LidarComRequisicaoMatlab	
ConfigurarCelulas	Step	
ConfigurarGerentes		
EnviarRequisicaoParaServicoNoDF		
IniciarAgenteJanela		
RegistrarseNoDF		

desenvolvido na linguagem Java⁴. Fornece serviços de páginas brancas e amarelas, e protocolos de comunicação e interação de agentes, além de ferramentas para a mobilidade de agentes entre plataformas distribuídas.

A escolha pela utilização do JADE como plataforma de SMA tem como consequência a necessidade de utilização da linguagem Java para o desenvolvimento do projeto. Para o desenvolvimento do protótipo, utilizou-se a plataforma de desenvolvimento Eclipse⁵ (versão *Helios Service Release 2*), ferramenta amplamente difundida para o desenvolvimento de aplicações Java. A preparação do ambiente, inicialização e execução dos agentes requer a instalação do *middleware* JADE, disponível no *site* da plataforma⁶. Conforme descrito na literatura básica do JADE (Bellifemine et al., 2007), para a inicialização dos agentes na plataforma, é necessário que o projeto seja compilado e sua estrutura de arquivos binários seja copiada para o diretório raiz do JADE. As bibliotecas utilizadas (arquivos .jar) também devem estar aí localizadas.

Para todo o processamento de imagens foi utilizado a ferramenta *Simulink*⁷ do *software* Matlab⁸, versão 7.10.0.499 (R2010a), exportado pela biblioteca *matlabcontrol*, a qual provê uma interface e permite que agentes JADE interajam com sistemas desenvolvidos no Matlab.

Embora a ferramenta JADE possibilite a programação distribuída, a implementação do protótipo e a execução das simulações foram realizadas de maneira local. Para a execução dos testes da ferramenta proposta, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Imagens, Sinais e Áudio (LISA) do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Brasília, com utilização de três máquinas para tratamento das imagens na simulação:

- Máquina A - Processador Intel core 2 Duo de 1.86 GHz, memória RAM de 2GB, sistema operacional de 32 bits;
- Máquina B - Processador Intel core i5 de 2.27 GHz, memória RAM de 4GB, sistema operacional de 64 bits;

⁴<http://www.java.com>

⁵<http://www.eclipse.org/>

⁶<http://jade.tilab.com>

⁷<http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html>.

⁸<http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

- Máquina C - Processador Intel core 2 Duo de 2,20 GHz, memória RAM de 2GB, sistema operacional de 32 bits.

Todas a arquitetura computacional implementa o modelo conceitual definido. Para atestar o funcionamento da ferramenta, um estudo de caso para uma área do bioma Cerrado foi simulado, conforme descrição no Capítulo 6.

Capítulo 6

Estudo de Caso e Resultados

A ferramenta MASE foi desenvolvida como um instrumento de investigação da dinâmica de fenômenos espaciais sob a intervenção de agentes humanos. Seu modelo pode ser aplicado para cobertura ou uso da terra em determinada porção do espaço. O modelo não é um modelo genérico de mudança, portanto ainda não foram analisadas as possíveis aplicações além da tradicional alteração da cobertura da terra ou de transição de uso da terra, como, por exemplo, para avaliação de fragmentação, desenho de corredores ou replicação de processos de difusão. Para ilustrar o potencial de aplicação da ferramenta foi realizado o estudo de caso da dinâmica do uso da terra no Distrito Federal (DF), com foco nas alterações advindas da agricultura e da pecuária.

Serão apresentados a área em análise e os parâmetros específicos adotados para configuração da ferramenta e modelo. O foco da descrição será apenas nos insumos fornecidos à ferramenta MASE, uma vez que a metodologia para a escolha dos parâmetros, o funcionamento e regras do modelo, bem como os detalhes de implementação foram descritos nas Seções 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

Para o estudo de caso, os resultados esperados são os mapas de cobertura e uso da terra em projeções futuras e as taxas de mudança ocorrida no período. Após isso, os experimentos de simulação são descritos e os resultados são apresentados e discutidos. Para a validação dos resultados obtidos, dois são os parâmetros adotados: (i) Quantidade de mudança - comparação das taxas de mudança entre a projeção simulada e a imagem real; e (2) Alocação de mudança - comparação dos locais onde ocorreram as transformações no uso da terra na simulação são compatíveis com os dados obtidos pelas imagens de satélite.

6.1 Estudo de Caso para o Distrito Federal

A área definida para a aplicação do modelo e teste da ferramenta foi o Distrito Federal, Unidade Federativa que tem 100% do seu território em região de Cerrado, conforme ilustrado na Figura 2.12 e Tabela 2.1. A escolha pelo Cerrado justifica-se por atualmente ser o bioma mais pressionado pela intensificação do uso da terra, por ser considerado um *hotspot* de biodiversidade, por ter esforço de conservação ínfimo, quando comparado a outros biomas (principalmente com a Amazônia) e pelo desconhecimento da população e dos tomadores de decisão quanto à sua importância. A fundamentação da escolha do Cerrado foi apresentada em detalhes na Seção 2.3.

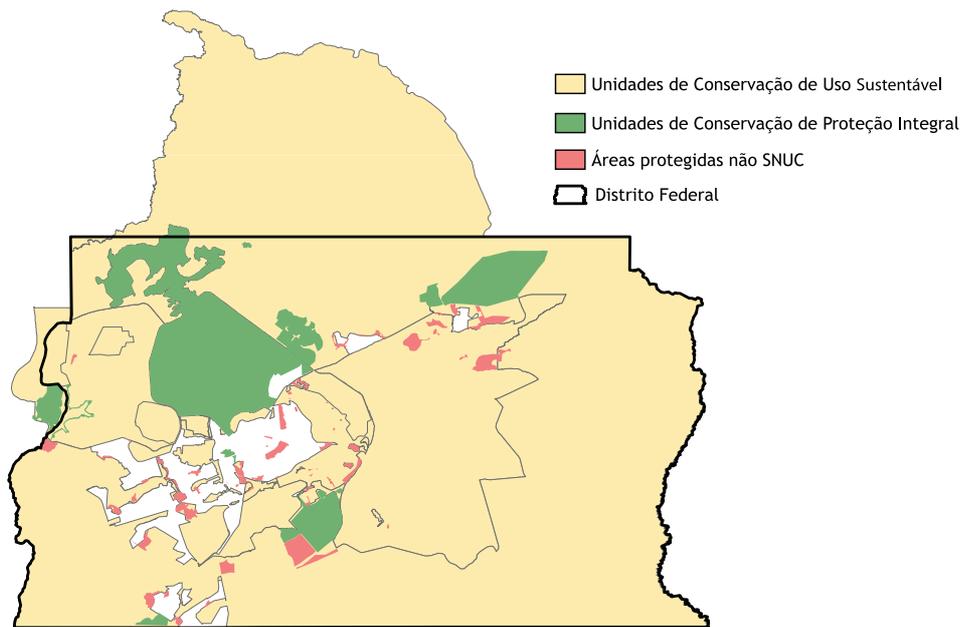


Figura 6.1: Unidades de Conservação do DF e entorno.

A seleção do DF, dentre as demais UFs que abrigam o bioma Cerrado, dá-se por fatores diversos. Com área de $5.787,784\text{Km}^2$ ¹, estima-se que 68,11% da vegetação nativa já foi desmatada até 2008 (Ibama, 2009). Esta informação contrasta com o fato de que aproximadamente cerca de 90%² da área total do DF é protegida por alguma categoria de unidades de conservação ou áreas protegidas (pertencentes ou não ao Sistema Nacional SNUC), de proteção integral e uso sustentável (Figura 6.1). Além desses fatores, a facilidade de obtenção de informação facilitou o processo de seleção da escolha. Entretanto, a possibilidade de investigar as consequências do Plano Diretor de Planejamento Territorial do DF, o PDOT, muito discutido e envolvido em polêmicas sobre as destinações da terra, supostamente influenciadas por interesses políticos e econômicos, emergiu como o candidato inicial para explorar as capacidades da ferramenta.

Foram utilizadas as imagens do Satélite LANDSAT ETM+, classificadas pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por satélite (MMA/Ibama) e o Mapa de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros (MMA), escala 1:250.000, resolução de 30m, ano base 2002. A disponibilidade de um conjunto classificado de imagens da cobertura da terra do DF, para dois momentos de tempo distintos, 2002 e 2008, apresentou-se como oportunidade para testar as funcionalidades básicas da ferramenta e os conceitos subjacentes ao modelo. Embora existam imagens de satélites mais atuais, o esforço de classificação das imagens não justifica sua utilização no estudo de caso nesse primeiro momento, sendo que o objetivo é validar a definição do modelo e o protótipo implementado. É possível encontrar classificações mais recentes, entretanto, a opção pe-

¹IBGE. Perfil do Distrito Federal. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>

²ZEE DF. Secretaria de desenvolvimento urbano e meio ambiente do DF. Disponível em:www.zee-df.com.br

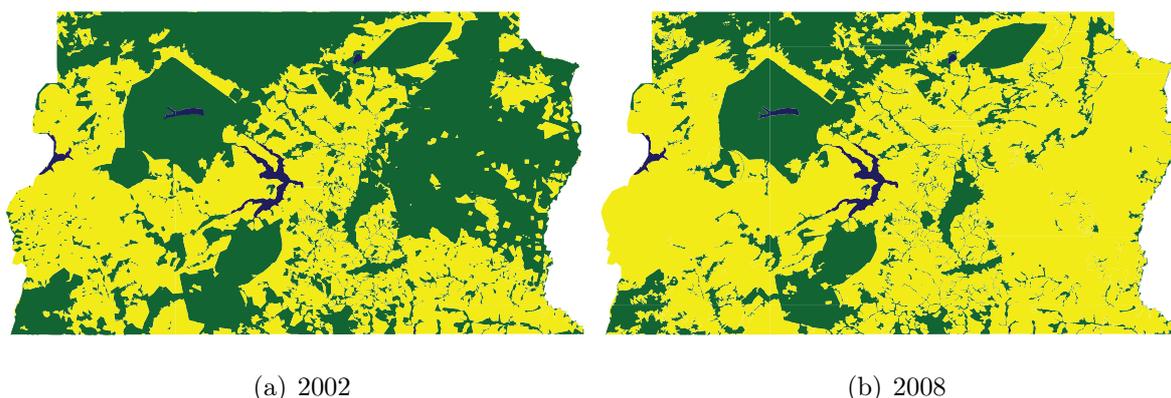


Figura 6.2: Imagens com a classificação da cobertura da terra no DF. Fonte: Ibama.

los dados oficiais do governo brasileiro e por dois conjuntos de imagens classificados sob mesma metodologia imperaram na decisão.

A visão das imagens classificadas para os dois anos é apresentada na Figura 6.2. São três as classes contidas na imagem: área de vegetação natural ou vegetação remanescente (RGB 0-100-0), área de uso antrópico (RGB 255-255-0) e corpos d'água (RGB 0-0-100), conforme segue:

- Área de Vegetação Natural - áreas que mantêm a cobertura de vegetação ou o Cerrado em sua constituição natural. São englobadas aqui as áreas de conservação ambiental, como as UCPI.
- Área de Uso Antrópico - áreas que já sofreram processo de desmatamento. A alteração da cobertura da terra original pode se dar por cultivo agrícola, pastagens, área com influência urbana ou área degradada pela mineração.
- Corpo d'água - acumulação perene de água, como lagos e ou reservatórios, de águas naturais ou artificiais.

A imagem classificada do ano de 2002 é a entrada para a ferramenta MASE. Ela irá indicar o cenário inicial para a atuação dos agentes. A imagem de 2008 não será utilizada na simulação, apenas na validação dos resultados.

6.1.1 Parâmetros da Simulação

Quanto à complexidade temporal, a simulação efetuada tem duração de sete anos (período 2002-2008), sendo 2002 o t_0 . A unidade de tempo definida para simulação é de uma semana. No total, foram realizados 365 *steps* ($7anos \times 52,15semanas$) para cada simulação (conforme apresentado Seção 5.2.1, pág. 70).

Quanto à complexidade espacial, a extensão do modelo é a área do Distrito Federal, enquanto a resolução das imagens considera o *pixel* com as dimensões $50 \times 50m$. Um agente espacial, ou célula, equivale a um agrupamento de 4 pixels, conforme ilustrado na Figura 6.3. Portanto, cada célula representa uma área de $100m^2$. Todas as imagens do conjunto de entrada devem ser trabalhadas nessa mesma resolução.

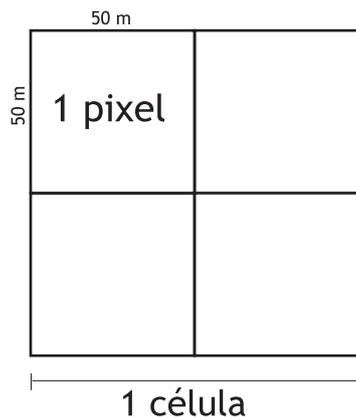


Figura 6.3: Resolução espacial da célula utilizada para o MASE.

Ainda em relação aos parâmetros de espaço, foi utilizado para a simulação o conceito de vizinhança radial, com $r = 3$ para todos os agentes, ou seja, a vizinhança percebida pelo agente transformador segue o mesmo padrão explicitado na Figura 2.4 (c).

Em relação à complexidade dos tomadores de decisão, no caso dos agentes humanos, duas são as tipologias simuladas para o estudo de caso do DF: agricultores e pecuaristas. Embora o modelo e a ferramenta já contemplem as tipologias de urbanizador e conservacionista, essas não foram abordadas no primeiro estudo de caso. O número de agentes pecuaristas e agricultores é parâmetro informado pelo usuário. Foram realizadas simulações com 20 e 40 agentes de cada tipologia, conforme detalhado posteriormente nos experimentos (Seção 6.2). A capacidade de exploração de cada um desses agentes foi atribuído como 150 unidades por *step*. Todos os demais atributos e regras de comportamento são os mesmos dos que os descritos no modelo.

Conforme a metodologia proposta por [Agarwal et al. \(2001\)](#) e descrita na Seção 4.1, o nível de complexidade humana modelado pode ser classificado como nível cinco, onde a tomada de decisão humana é feita por um tipo de agente, cujas decisões são modeladas prioritariamente em relação às escolhas feitas com base em variáveis que afetam outros processos e resultados.

6.1.2 Classes de Uso da terra no DF

O submodelo LUCC, presente na definição do modelo MASE, é aquele derivado de [Smith et al. \(1998\)](#), apresentado na Figura 5.8. As classes de uso da terra e os processos de transição possíveis são retratados ali, entretanto, fez-se necessário analisar a realidade do DF frente a esse modelo. Para isso, trabalhos de classificação da terra para a região foram consultados. Conforme o mapeamento de [Sano et al. \(2008\)](#), o DF apresenta as seguintes classes de uso de terra: Cultura agrícola, Pastagem cultivada, Massa d'água, Vegetação nativa e Área urbana. Na escala de estudo (1:250.000) não foram detectadas áreas de mineração e as áreas de reflorestamento são pouco significativas. A proporção de ocupação das áreas é apresentada na Figura 6.4.

Algumas características apresentadas para o modelo e definidas para o estudo de caso são essenciais para o entendimento das decisões arquiteturais implementadas no protótipo. A adaptação entre as classes de uso da terra mais usuais para o DF e os processos

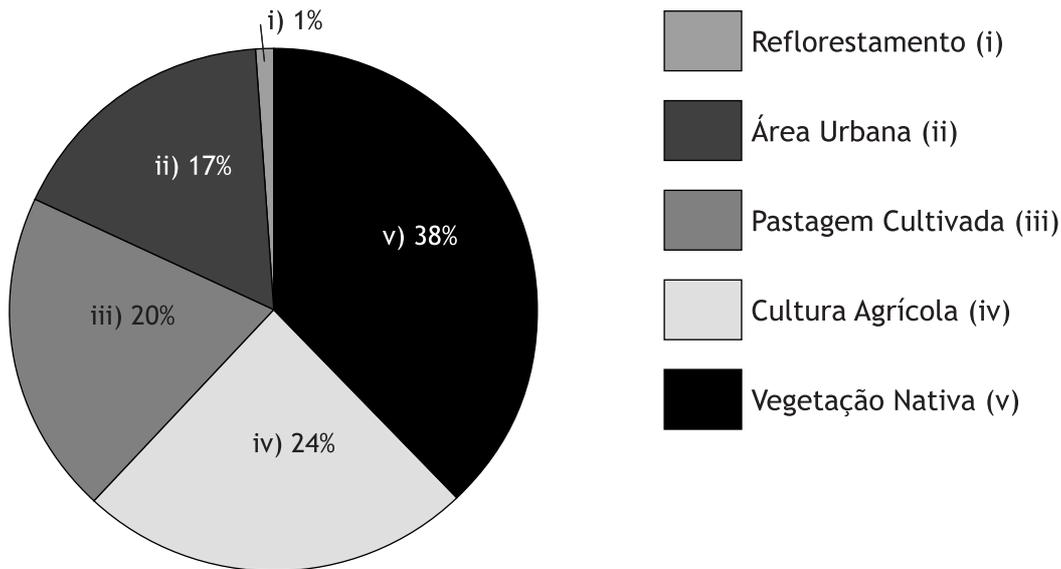


Figura 6.4: Distribuição das classes de uso da terra para o DF.

que regem essas trocas foram simplificados em uma máquina de estados finitos (FSM) explicitada na Figura 6.5. Essa FSM é utilizada na gerência da transição dos estados das células do *grid*. Sintetiza quais são os processos possíveis considerando o universo das classes de uso da terra do DF. As linhas em destaque são aquelas possíveis para o caso de uso simulado.

6.1.3 Variáveis Proximais

As variáveis proximais consideradas no estudo de caso foram as mesmas explicitadas durante o detalhamento do modelo: ferrovias, rodovias, ruas, edificações, cursos d'água, corpos d'água e unidades de conservação de proteção integral. As mesmas relações de estímulo, entre os agentes e as variáveis proximais, são adotadas para o estudo de caso. Cada uma das imagens é tratada com o filtro gaussiano e procedimentos descritos na Seção 5.2.3, resultando no conjunto de imagens da Figura 6.6 ($h_{size} = 11$ e $\sigma = 2$). O tamanho do filtro é parâmetro que pode ser alterado pelo usuário.

A composição de todas as variáveis proximais para o DF, após a aplicação do filtro e do cálculo de uma média ponderada dos fatores de estímulo, pode ser visualizada na Figura 6.7. Cada variável forma uma camada, ou *layer*, que será utilizada pelo agente para sua movimentação pelo espaço. Outra informação que é considerada para essa ação são as áreas de unidade de conservação de proteção integral, destacadas em verde na Figura 6.1, que auxilia a formação do mapa *Taux*, conforme descrito no modelo. Todo o quadro de ação e movimentação dos agentes, ocorre conforme o explicitado na Seção 5.2.3.

Outras variáveis proximais como clima, altitude e relevo, não foram considerados nesse estudo de caso devido a homogeneidade dessas características para a área de estudo, entretanto podem ser consideradas em outras simulações.

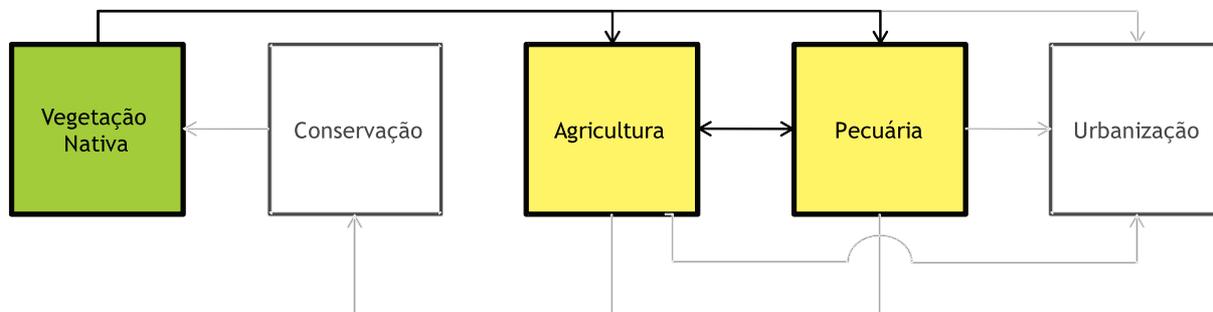


Figura 6.5: Máquina de estados determinística para o estado de conservação da terra.

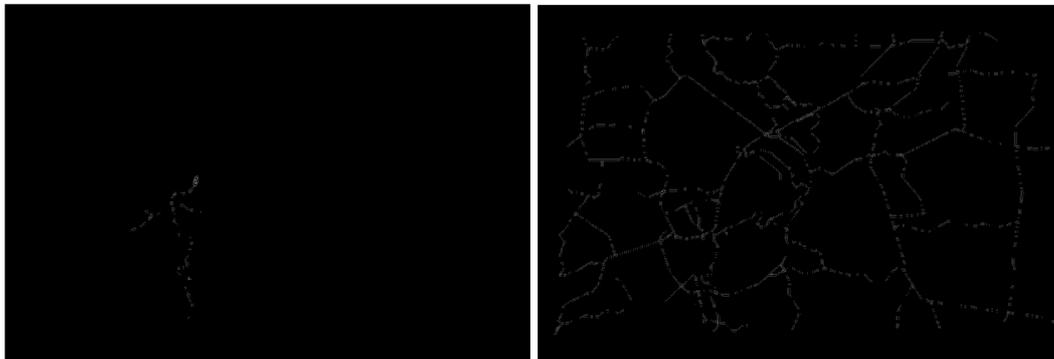
6.1.4 PDOT

A variável política escolhida para análise e investigação foi o PDOT do DF. O documento técnico (GDF, 2009) produzido pela Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano (SEDHAB) informa que o PDOT é hoje o instrumento técnico e legal que ordena o território e cuida do desenvolvimento integrado do Distrito Federal, incluindo áreas urbanas e rurais, conforme determina o Estatuto da Cidade³. Tem por função orientar as políticas públicas para o patrimônio cultural, meio ambiente, sistema viário, mobilidade e transporte, saneamento ambiental, energia, desenvolvimentos econômico e rural, habitação e equipamentos regionais, entre outras. O último PDOT em vigor no DF data de 1997. A revisão do PDOT/97 iniciou-se em 2004, mas só conseguiu avançar em 2008 e 2009. A revisão é necessária para adequar as mudanças sociais, econômicas e territoriais ocorridas nos últimos anos com relação à dinâmica urbana e ao estilo de vida da população do DF. Entretanto, apesar da revisão ter sido aprovada em 2009, com a redação da Lei Complementar nº803/2009, escândalos políticos levaram a um escrutínio da revisão proposta, com ação direta de inconstitucionalidade deferida nesse mesmo ano. Desde 2009, muito pouco se avançou na consolidação de uma nova revisão.

O PDOT é composto por diretrizes, critérios e estratégias e, o mais relevante para o estudo em questão, pelo macrozoneamento e zoneamento, que estabelecem as relações entre espaços urbanos, rurais e naturais, indicando as áreas de crescimento urbano, as áreas a serem preservadas e as situações de ocupação urbana e rural a serem mantidas, de acordo com um conjunto de tendências e vocações. Tais definições impactam enormemente o espaço, definindo zonas de incentivo e subsídio a alguns tipos de uso da terra. São quatro as grandes divisões espaciais do PDOT: (i) a macrozona urbana, (ii) a macrozona rural, (iii) a macrozona de proteção integral e (iv) as áreas de diretrizes especiais.

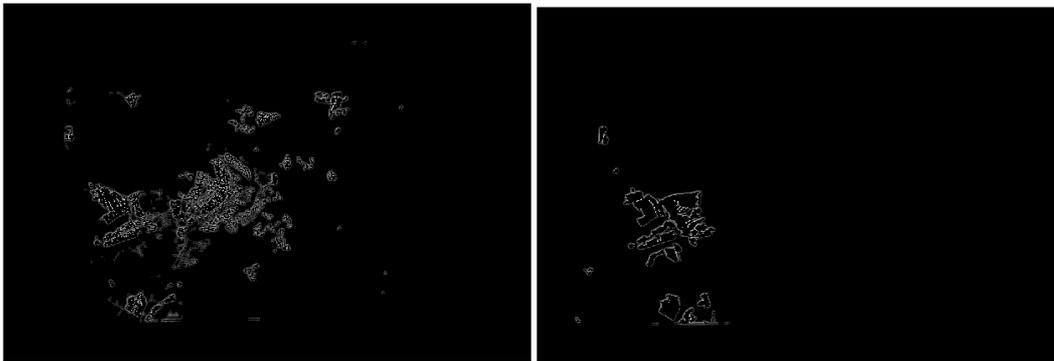
A Macrozona Urbana define, conforme a sua denominação, áreas denominadas às atividades urbanas, com infraestrutura já consolidada para esse tipo de uso, com incentivos aos setores secundários e terciários. Já a Macrozona Rural reúne os espaços destinados

³Estatuto da Cidade, Lei nº10.257, de 10 de julho de 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm



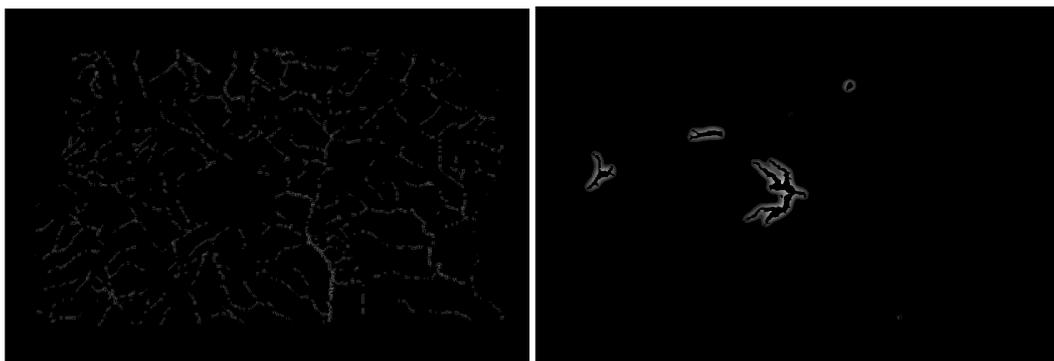
(a) Ferrovias

(b) Rodovias



(c) Ruas

(d) Edificações



(e) Cursos d'água

(f) Corpos d'água

Figura 6.6: Variáveis proximais que configuram o ambiente no DF.

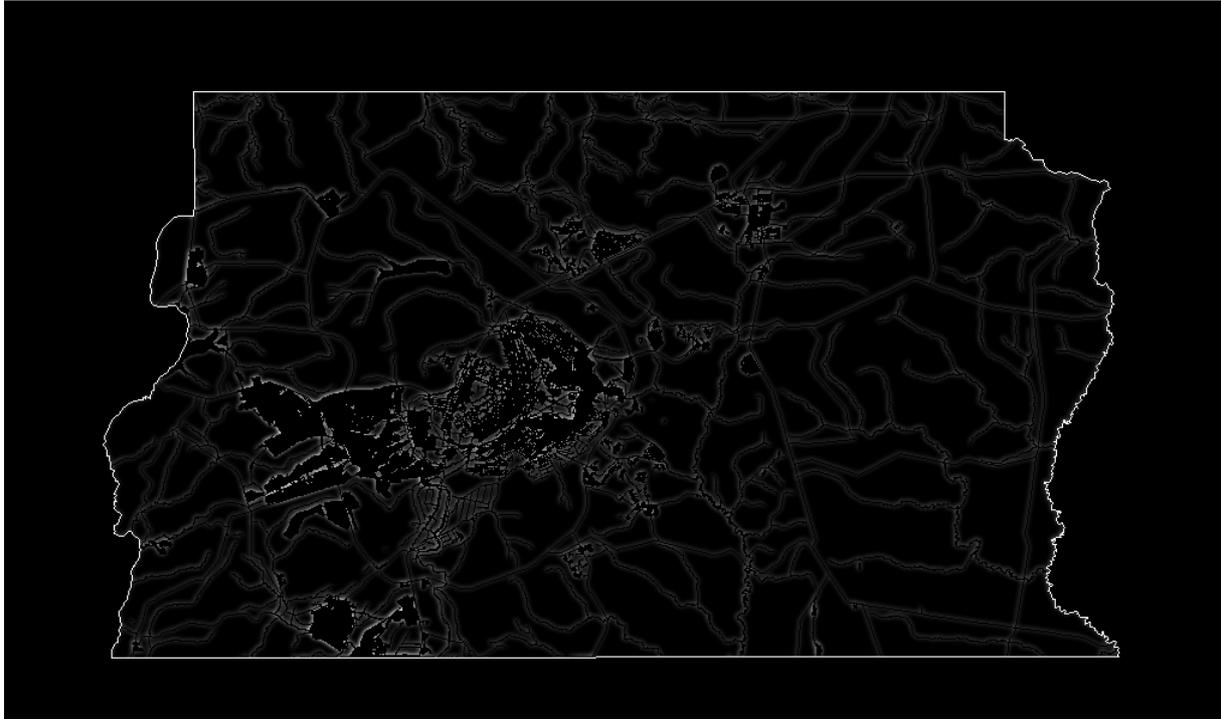


Figura 6.7: Composição das *layers* que caracterizam o ambiente físico do DF.

às atividades rurais, principalmente do setor primário. Ao analisar os agrossistemas e as bacias hidrográficas, o governo do DF propôs 2 subdivisões, apresentadas pela Figura 6.8, a saber:

- Zona Rural de Uso Diversificado - zona de consolidação do uso da terra para atividades agrossilvipastoris. Composta, principalmente, por terras planas que favorecem a produção de grãos em larga escala, com mecanização e irrigação. O GDF considera a produtividade na região como o fator responsável pela inserção do DF no contexto do agronegócio regional. Há o incentivo explícito à agricultura e pecuária, objetivando reforçar a vocação rural da região, estimulando usos intensivos e a verticalização da produção.
- Zona Rural de Uso Controlado - zona em que já existe agricultura e pecuária consolidada, mas que deve ser controlada (restrita). As diferentes áreas rurais que compõem esta zona têm em comum a necessidade de maior controle do uso e ocupação do solo, devido à restrições decorrentes de sua sensibilidade ambiental e da necessidade de proteção dos mananciais destinados ao abastecimento de água da população. O informe técnico da SEDHAB esclarece que devido à existência de propriedades que não dispõem das condições necessárias à competitividade no agronegócio (dificuldade e acesso a água, solos inadequados, dimensões incompatíveis, dificuldades de acesso à tecnologias apropriadas etc.) aliada à proximidade com núcleos urbanos e maior acessibilidade viária, esses espaços sofrem constante pressão para sua alteração por usos urbanos, quase sempre promovidos de forma irregular. Entretanto, é diretriz de governo incentivar aí também o agronegócio, desolcando para outras frentes a expansão urbana. Portanto prevê-se nessa área a recuperação da capacidade pro-



(a) Zona de Uso Diversificado

(b) Zona de Uso Controlado

Figura 6.8: Detalhes da Macrozona Rural - PDOT DF.

ductiva, com o incentivo às atividades agroecológicas, agro-florestais, à agricultura orgânica, ao turismo rural, entre outros.

A Macrozona de Proteção Integral compreende os grandes espaços legalmente protegidos do DF, destinados à preservação da natureza, onde é admitido apenas o uso indireto dos recursos naturais. Assim, nessa macrozona, os espaços têm sua finalidade ambiental definida por lei específica, não sendo permitidas atividades urbanas ou rurais. A macrozona é composta pelas unidades de conservação consideradas como de proteção integral: Parque Nacional de Brasília; Estação Ecológica de Águas Emendadas; Estação Ecológica do Jardim Botânico; Reserva Ecológica do IBGE; Reserva Ecológica do Guará; Reserva Ecológica do Gama; Reserva Ecológica do Lago Paranoá; Estação Ecológica da Universidade de Brasília - áreas de relevante interesse ecológico de Capetinga e Taquara; Reserva Biológica do Descoberto; e Reserva Biológica de Contagem. Tais áreas podem ser visualizadas na Figura 6.1. Finalmente, as Áreas de Diretrizes Especiais são espaços com características especiais que se sobrepõem a outras macrozonas do PDOT. Evidenciam áreas que necessitam de tratamento diferenciado, como as unidades de conservação de uso sustentável não inclusas na Macrozona de Proteção Integral e áreas de drenagem de pequenas captações de água destinadas ao abastecimento público.

Esse cenário proposto em 2009 para o DF foi incorporado no estudo de caso da dinâmica do uso da terra no DF. Para isso, uma imagem com 3 classes foi gerada, para guiar os agentes transformadores do uso do solo. Como o estudo de caso tem o foco na ação dos agentes agricultores e pecuaristas, as classes escolhidas para compor a simulação também são as que retratam melhor os incentivos e desestímulos dessas atividades de uso na terra, evidenciando a Macrozona Rural, segundo o PDOT, a saber:

- Zona Rural de Uso Diversificado - identificada pela cor verde na Figura 6.9 (RGB 0-255-0);
- Zona Rural de Uso Controlado - indentificada na cor azul (RGB 0-0-255);
- Macrozona Urbana e Macrozona de Proteção Integral - , as classes restantes foram agrupadas por se mostrarem impeditivas à expansão do agronegócio, identificada em vermelho (RGB 255-0-0)

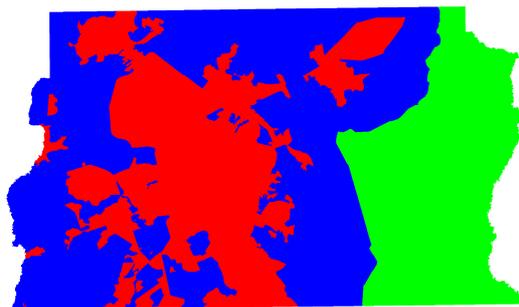


Figura 6.9: Classificação do PDOT utilizada para os agentes agricultor e pecuarista.

Na análise do comportamento das transformações do uso da terra pela agricultura e pecuária, o PDOT traz clara influência sobre a atividade dos agentes, demarcando áreas de intensificação da exploração e áreas de desaceleração ou desestímulo para os dois agentes em estudo. O comportamento dos agentes altera o mapa de utilidade de cada tipologia, incentivando os agentes a movimentarem-se para as zonas onde há subsídio do PDOT. Especificamente, a função de utilidade ganha um impulso de 10% na Zona Rural de Uso Diversificado.

A intenção da inclusão do PDOT na simulação é a verificação da aplicação dessa política na realidade, investigando suas consequências, uma vez que a versão final ainda não foi aprovada e seria possível gerar informação para a evolução dessa proposta pela análise dos resultados da simulação obtidos. O PDOT é incluído como uma imagem, que representa áreas espaciais de atração ou repulsão de agentes. Isso faz com que a coesão entre agentes e espaço seja reforçada, tornando o modelo mais próximo a realidade.

6.2 Descrição dos Experimentos de Simulação

Após a especificação dos parâmetros utilizados para o estudo de caso, um conjunto de simulações foi executado para a verificação das funcionalidades da ferramenta e do alcance dos resultados esperados, ou seja, dos mapas de cobertura e uso da terra nas projeções futuras. Os resultados foram estimados de maneira (i) quantitativa, (ii) conforme a alocação das mudanças no uso da terra e (iii) conforme o desempenho geral da ferramenta. A análise quantitativa buscou avaliar a taxa de mudança total, ou seja, em termos de quantidade de mudança (número de *pixels* que tiveram o seu tipo de uso ou cobertura alterados, como a simulação pode ser comparada ao comportamento observado realmente no intervalo de 2002 a 2008. Um exemplo de análise quantitativa é a comparação da área total desmatada no mapa simulado e o desmatamento observado para o período. Já a alocação de mudança buscou avaliar o modelo de modo mais qualitativo ao comparar, *pixel* por *pixel*, se a ferramenta alocou corretamente a mudança, informando a porcentagem do espaço que teve sua tipologia de uso da terra predita com acerto (número de *hits*) ou não (número de *misses*). Ambas as análises (i) e (ii) abrangem todo o espaço analisado, diferente de algumas propostas de validação de ferramentas que avaliam o desempenho da ferramenta pela verificação de pontos aleatórios. O desempenho geral da ferramenta é talvez a mais subjetiva das avaliações, realizada conforme a percepção do grupo de pesquisa acerca do desempenho, robustez e padrão de resposta dos agentes.

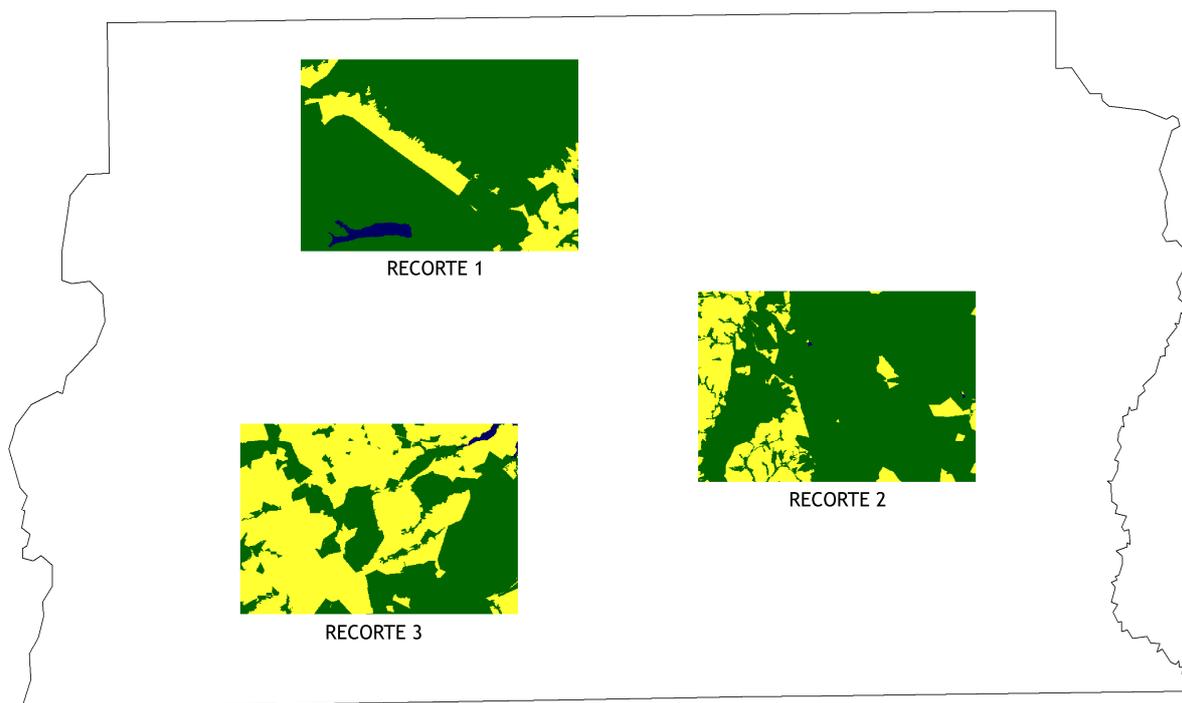


Figura 6.10: Identificação das três áreas simuladas no Experimento 1.

Cada célula do espaço ($100m^2$) é um agente espacial, e cada agente é uma entidade de *software* que contém autonomia. A criação, inicialização, coordenação e comunicação de todo o grupo de agentes demanda alto esforço computacional. Mantendo a resolução espacial descrita no estudo de caso, para a simulação da área total do DF seriam necessários cerca de 57,8 milhões de agentes espaciais, o que certamente não seria viável para máquinas de usuários comuns e implementação local. Portanto, para manter a resolução proposta, a área total do DF foi dividida em setores para reduzir a carga computacional do projeto. Ao todo foram realizados quatro grupos de experimentos, cada um com descrições e resultados dispostos a seguir.

6.2.1 Experimento 1

O primeiro experimento selecionou três recortes aleatórios do DF, de modo que o maior número de composições de mapas originais, variáveis proximais e zonas do PDOT pudessem estar representadas. A imagem de entrada (ano 2002), bem como as variáveis proximais e as configurações do PDOT foram geradas para cada um dos recortes. A Figura 6.10 apresenta a localização dos três recortes selecionados para a simulação. É possível notar a variabilidade entre as composições das variáveis proximais, ou *layers*, e da composição do PDOT para os recortes, como ilustra a Figura 6.11.

Os parâmetros do experimento são os mesmos descritos na Seção 6.1. As simulações, para cada recorte, foram efetuadas e o conjunto de imagens de saída foram compilados em

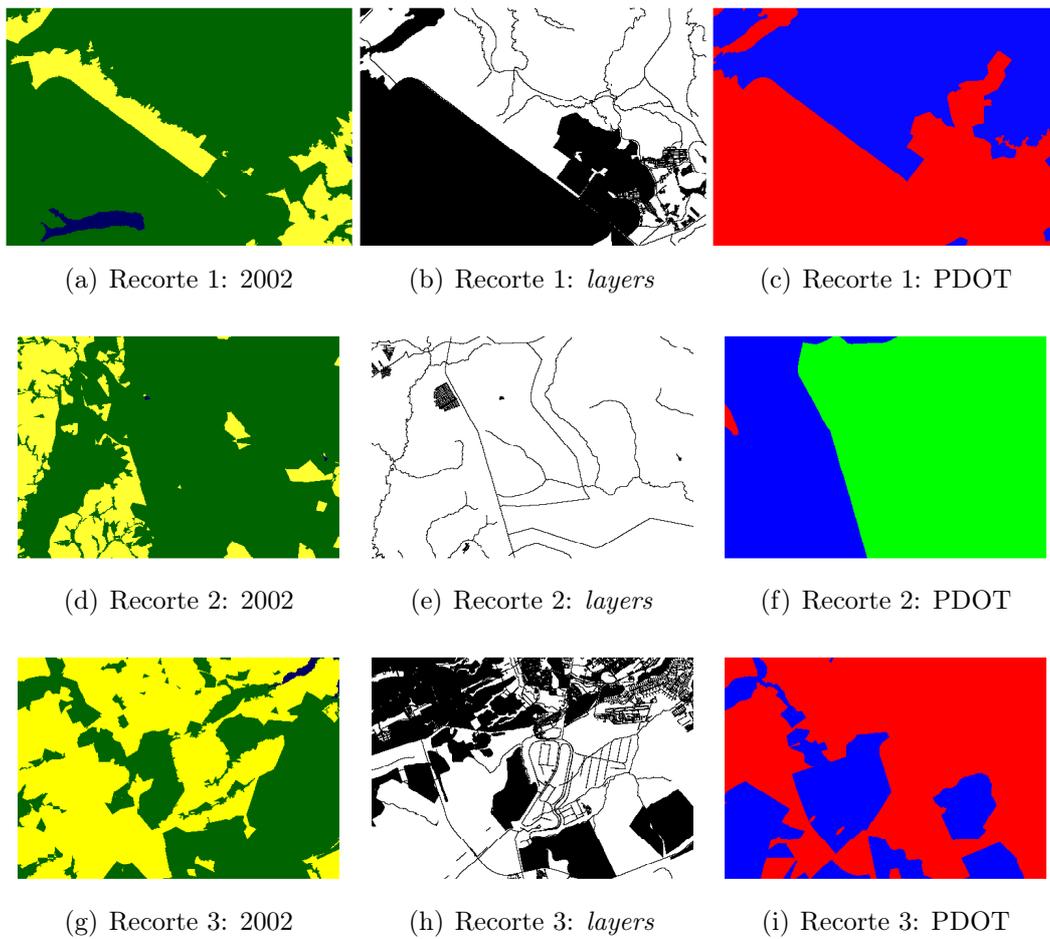


Figura 6.11: Conjunto de imagens para os três recortes simulados no Experimento 1.

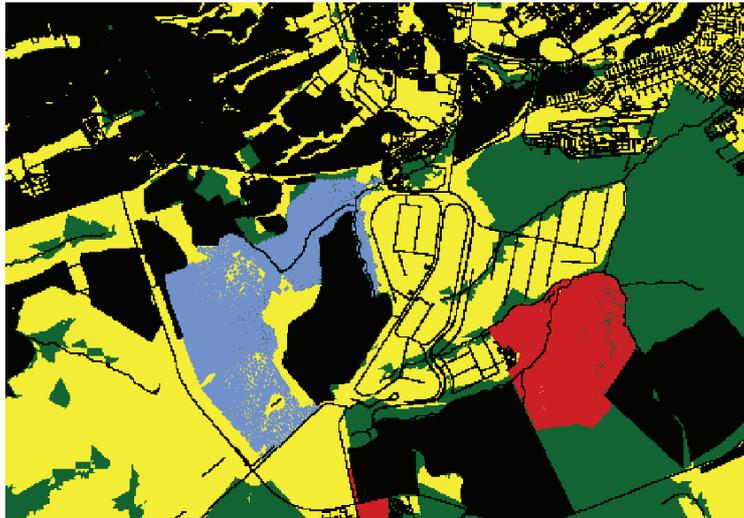


Figura 6.12: Detalhe da simulação resultante do Experimento 1.

vídeos, um por recorte, com 15 *frames* por segundo, disponíveis no canal da ferramenta MASE no *Youtube*⁴, pelos endereços:

Simulação Recorte 1 : <http://www.youtube.com/watch?v=krS58-dogHk>

Simulação Recorte 2 : <http://www.youtube.com/watch?v=pwnD70BN8p8>

Simulação Recorte 3 : <http://www.youtube.com/watch?v=9GZnm1q0EsQ>

Cabe destacar que, para facilitar a visualização e o entendimento da ação dos agentes, foram destacados por cores diferentes as transformações resultantes da ação dos agentes agricultores e pecuaristas. Como ilustrado na Figura 6.12, que apresenta um *frame* da simulação para o recorte 3, os espaços representados em vermelho demarcam as transformações advindas da agricultura, enquanto azul representa pecuária.

O tempo médio de simulação para cada recorte foi cerca de quatro minutos. Os resultados são apresentados na Tabela 6.1 a seguir. Entende-se por posições ignoradas todas aquelas que não estão sob ação dos agentes de transformação, ou seja, todas aquelas que estão demarcadas por alguma variável proximal, como uma edificação ou um lago. Essas posições ignoradas foram retiradas para evitar falsos resultados já que, por definição, não é possível que nesses pontos ocorra transformação. Todas as demais informações são portanto relativas, ou seja, consideram como 100% o total de posições passíveis de serem transformadas, excluindo aí as posições ignoradas.

Os resultados de quantificação da mudança são dependentes do número de agentes transformadores, das taxas de exploração de cada agente e da percepção da vizinhança por cada agente agricultor ou pecuarista. Um bom resultado indica uma calibração adequada desses parâmetros. Já os resultados de alocação da mudança, são mais influenciados pela composição das variáveis proximais, pelos pesos atribuídos as variáveis e suas relações de estímulo com cada tipologia de agente, bem como da posição de inicialização dos agentes transformadores. É possível que a alocação não seja compatível com a ocorrida no mundo

⁴<http://www.youtube.com/user/MASEsystem>

Tabela 6.1: Resultados do Experimento 1 para a simulação dos 3 recortes.

	Recorte 1	Recorte 2	Recorte 3	
Posições Ignoradas	57,9898	21,6615	52,7554	
Quantificação da Mudança¹	Exploração no mapa real	41,1481	81,7098	68,4015
	Preservação no mapa real	58,8518	18,2902	31,5985
	Exploração no mapa simulado	58,2718	46,0431	69,6089
	Preservação no mapa simulado	41,7281	53,9569	30,3920
Alocação da Mudança²	Qtde de <i>hits</i>	63,7871	40,5883	86,6053
	Qtde de <i>misses</i>	36,2129	59,4112	13,3947

¹Porcentagem de células não avaliadas. Números apresentados com quatro casas decimais.

²Porcentagem relativa, desconsiderando as posições ignoradas.

observado devido a ausência de uma variável proximal relevante, ou pela má alocação da posição inicial dos agentes. A questão da alocação inicial dos agentes é uma das mais delicadas. O modelo e a implementação da ferramenta determinam que estes iniciem no local de maior valor no mapa de utilidade, entretanto na realidade podem existir fatores diversos que não são abordados na concepção teórica, pois um agricultor pode explorar uma área do espaço que não é nem remotamente a mais “adequada”, mas é a área que ele tem posse, por exemplo.

Pela visualização da simulação, é possível perceber a movimentação dos agentes e a influência das variáveis proximais, ou seja, do ambiente físico na determinação das decisões dos agentes transformadores. Principalmente na simulação do recorte 2, fica claro que a movimentação dos agentes segue as linhas de hidrografia e rodovias descritas no ambiente físico. De modo geral, os agentes possuem movimentação fluida pelo espaço, agrupando-se nos locais mais atrativos e formando manchas de exploração. Esse comportamento é observado na realidade, o que indica que a representação dos comportamentos sociais modelados é adequada ao problema. Não observou-se nenhuma irregularidade às restrições impostas na modelagem, portanto o comportamento observado é resultante unicamente das regras estabelecidas e da tomada de decisão local.

A simulação para o recorte 3 obteve o melhor resultado, tanto na quantificação da mudança quanto na quantificação da mudança. O recorte 3 apresenta uma variada composição de variáveis proximais e PDOT, o que esboça que o sistema de tomada de decisão consegue lidar com a complexidade local e que a autonomia dos agentes é satisfatória. Entretanto, não foi verificada mudanças no tipo de uso da terra, ou seja, as áreas exploradas pela agricultura e pecuária ocorreram em espaços distintos e sem mudança de estado. Se por um lado essa informação retrata que as regras de prioridade dos agentes sob o espaço foram implementadas de modo acertado, não é possível avaliar o resultado da implementação das regras de sucessão do uso da terra, embora seja factível que não haja mudança no uso da terra em um período de 7 anos.

O recorte 2 foi o que apresentou-se mais diferente do comportamento observado na realidade. A área do recorte 2 é uma área quase que inteiramente dedicada à Macrozona Rural, com grande parte composta pela Zona de uso diversificado, a que, segundo o mo-

Tabela 6.2: Síntese dos resultados do Experimento 1 para os 3 recortes.

Quantificação da mudança ¹	Alocação da Mudança ²
Acerto médio =	Média de <i>hits</i>
84,6%	63,7%

¹Erro recorte 1 = 17,1%; Erro recorte 2 = 27,9%; Erro recorte 3 = 1,2%. Erro médio = 15,4%.

²Média de *misses*= 36,3%.

delo, é a mais atrativa aos agentes das tipologias de agricultura e pecuária. A diferença da quantificação da mudança pode ter se dado devido ao número insuficiente de agentes no recorte, possivelmente pela área apresentar mais oferta de terras exploráveis do que a capacidade de exploração dos agentes. A diferença encontrada na alocação da mudança pode ser justificada pela ausência de algumas variáveis proximais na descrição do espaço físico. Pela análise da simulação percebe-se que a alocação dos agentes ocorreu em área que manteve-se com a cobertura original nos mapas de 2008. A alocação do agente naquelas redondezas culminou em uma exploração da área, aumentando o erro de alocação associado à simulação. Pela análise do conjunto de variáveis proximais pode-se verificar que a área explorada no mapa simulado é rica em cursos d'água, o que é um fator de estímulo ao comportamento definido para os agentes agricultores e pecuaristas. Entretanto, uma análise suplementar revelou que a área em questão no recorte 3, que foi preservada na realidade mas explorada na simulação, apresenta níveis altimétricos mais baixos que o da região em torno, que caracteriza-se como um extenso planalto. Esse pode ser um dos fatores que coibiu a conversão da vegetação natural de fato, o que não seria percebido pelo agente transformador uma vez que a altitude não é uma variável proximal. Um mapa de hipsometria⁵ poderia ser incluído como variável proximal em próximos estudos de caso.

O recorte 1 apresentou um comportamento intermediário aos demais, sendo notável que os agentes acompanham as linhas de cursos d'água e rodovias. É possível notar nessa simulação o respeito dos agentes às zonas do PDOT. Como o comportamento mapeado para a área em vermelho da Figura 6.9, que representa a Macrozona Urbana e a Macrozona de Proteção Integral, é que os agentes transformadores da terra das tipologias agricultura e pecuária não podem explorá-la, é possível notar claramente o desenho do contorno da área delimitada pelo PDOT, feita pela exploração dos agentes. Uma abordagem um pouco menos rígida, que permitisse a exploração dos agricultores e pecuaristas, mesmo que o zoneamento da área não contemple esses usos da terra, poderia ser investigado.

Os resultados finais do Experimento 1 são apresentados na Tabela 6.2. Em relação a alocação da mudança, a média de acertos - *hits* foi de 63,7%, com consequente taxa de erro de alocação - *misses*=36,3%). Quanto à taxa de acerto geral, o resultado aponta 84,6% com erro médio de 15,4%.

6.2.2 Experimento 2

O Experimento 2 divide toda a área do DF em um *grid* de $22.000 \times 22.000m$, com *pixels* na resolução $50 \times 50m$. A modelagem do experimento surgiu após a análise preliminar dos resultados do Experimento 1 e da necessidade de saber o comportamento da ferramenta

⁵Hipsometria é a técnica de representação da elevação de um terreno por meio de cores. Determina a altitude de pontos situados sobre um plano indicando altitudes iguais com cores equivalentes.

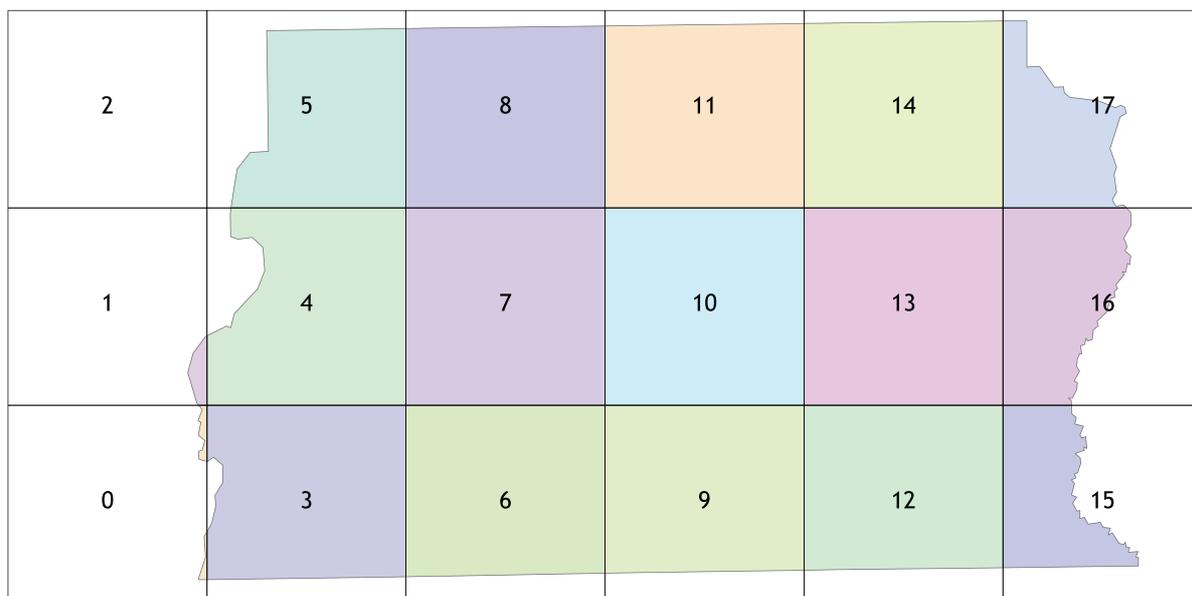


Figura 6.13: *Grid* de simulação do Experimento 2.

para todo o território do estudo de caso. Para isso, foram divididos 18 recortes (0 - 17), cada um com uma área de 48.400ha, nas dimensões 440x440 *pixels*. A divisão dos recortes, numerados de 0 a 17, pode ser observada na Figura 6.13.

Observe que não há área territorial do DF no recorte número 2, portanto, este estará ausente nos resultados. As mesmas definições adotadas na descrição do estudo de caso, realizadas para efetuar o primeiro experimento, foram repetidas no Experimento 2, tendo como única diferença o conjunto de imagens de entrada para cada um dos 17 recortes espaciais. Foram gerados o conjunto de imagens de entrada, derivadas da classificação das imagens de monitoramento do bioma, bem como todas as variáveis proximais e políticas. A simulação de cada recorte foi executada⁶ e as imagens resultantes compiladas em vídeos, um por recorte, disponíveis nos endereços:

Simulação Recorte 0 : <http://youtu.be/mPe300SkI0k>

Simulação Recorte 1 : <http://youtu.be/zthWLk6gxIc>

Simulação Recorte 3 : <http://youtu.be/F8Mo02dinUE>

Simulação Recorte 4 : <http://youtu.be/8NwIH2m3rjc>

Simulação Recorte 5 : <http://youtu.be/YWdxJhBwRT0>

Simulação Recorte 6 : <http://youtu.be/x2pCwJheDdM>

Simulação Recorte 7 : <http://youtu.be/6qISNZs7XS0>

⁶Não há território do DF no *recorte* 2.

Simulação Recorte 8 : <http://youtu.be/EeyBXeZ9mmc>

Simulação Recorte 9 : <http://youtu.be/JXvLFaeWgjE>

Simulação Recorte 10 : <http://youtu.be/kXW50EvdkvE>

Simulação Recorte 11 : <http://youtu.be/jG7LAHQyIig>

Simulação Recorte 12 : <http://youtu.be/wBE76F6pQzE>

Simulação Recorte 13 : <http://youtu.be/qRXgC2bly7w>

Simulação Recorte 14 : <http://youtu.be/6RcLeCQiHNY>

Simulação Recorte 15 : <http://youtu.be/EiprbARprZw>

Simulação Recorte 16 : <http://youtu.be/lJenn7u03Ww>

Simulação Recorte 17 : <http://youtu.be/eiTn1xL5xvI>

De modo semelhante à simulação do Experimento 1, os espaços ilustrados em vermelho representam as transformações da tipologia agricultura, enquanto os azuis, pecuária. As transições de uso da terra são destacadas para fins didáticos com a cor laranja. Uma visão das imagens finais de simulação de cada um dos recortes, equivalentes à exploração do ano 2008, podem ser visualizadas na Figura 6.14.

O tempo médio de simulação para cada recorte foi cerca de três minutos. A redução de tempo para o encontrado no Experimento 1 é resultado, principalmente, da área menor definida para o recorte. Os resultados são apresentados na Tabela 6.3.

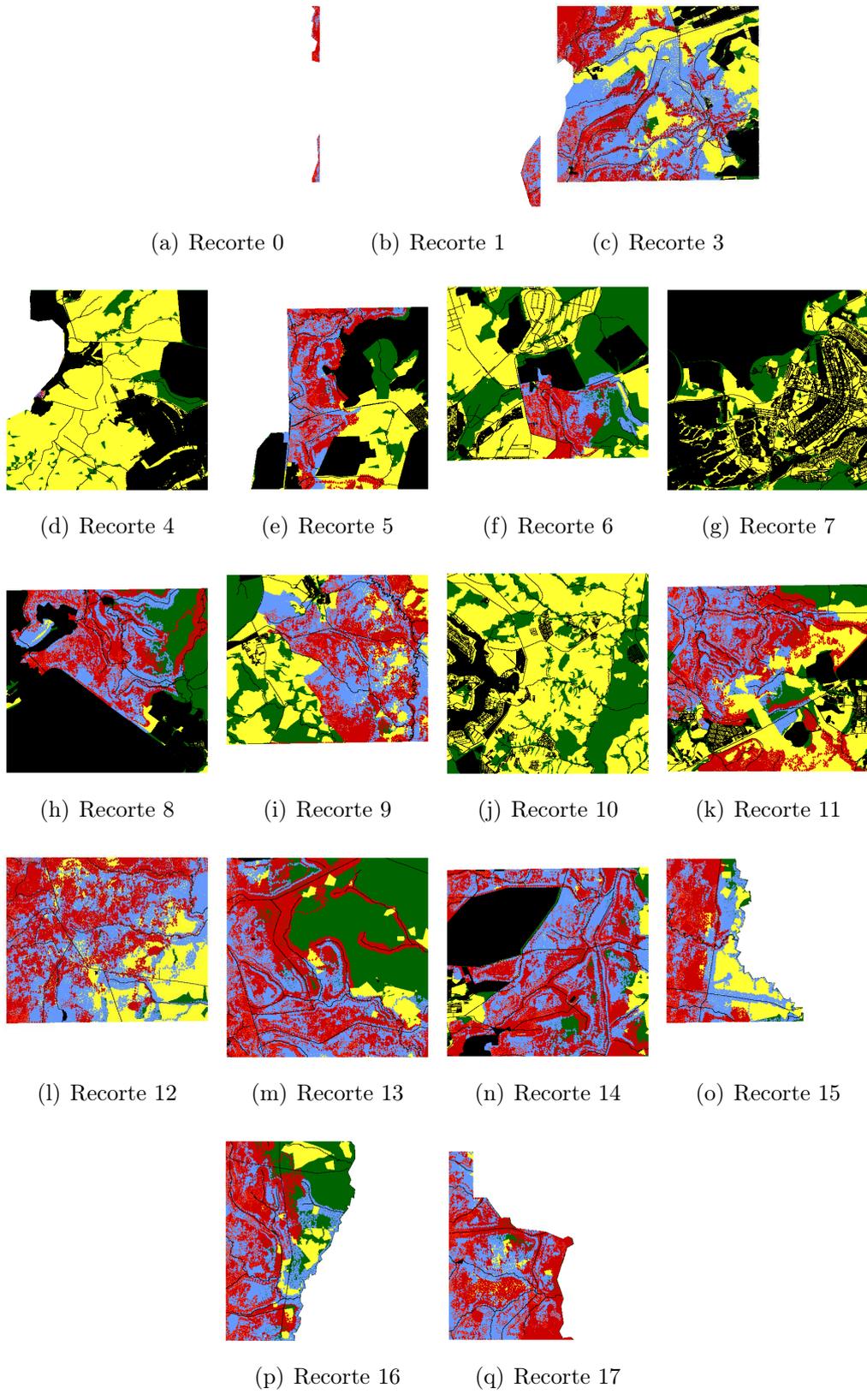


Figura 6.14: Visão do conjunto de imagens pós-simulação do Experimento 2.

Tabela 6.3: Resultados do Experimento 2 para a simulação dos 17 recortes.

Posições Ignoradas ¹	Quantificação da Mudança				Erro ²	Alocação da Mudança		
	Exploração no mapa real (%)	Exploração no mapa simulado (%)	Preservação no mapa real (%)	Preservação no mapa simulado (%)		Qtde de <i>hits</i> (%)	Qtde de <i>misses</i> (%)	
Recorte 0	98,9040	82,9988	93,4671	17,0012	6,53290	10,4683	76,4660	23,5340
Recorte 1	98,0957	100,0000	100,0000	0,0000	0,0000	0	100,0000	0,0000
Recorte 3	38,9139	70,8781	68,4774	29,1219	31,5226	2,4007	43,7686	56,2314
Recorte 4	55,0009	93,9469	0,21471	6,0531	99,7853	91,7998	6,2468	93,7532
Recorte 5	66,8948	71,4401	56,9165	28,5599	43,0835	14,5236	40,3356	59,6644
Recorte 6	44,1762	53,5666	19,0284	46,4334	80,9716	34,5382	32,2403	67,7597
Recorte 7	72,5643	78,5527	0,0000	21,4473	100,0000	78,5527	21,4473	78,5527
Recorte 8	62,6954	30,7595	71,9461	69,2405	28,0539	41,1866	39,7054	60,2946
Recorte 9	34,7028	73,0284	54,0476	26,9716	45,9524	18,9808	52,6624	47,3376
Recorte 10	32,8200	75,0388	0,0000	24,9612	100,0000	75,0388	24,9612	75,0388
Recorte 11	35,2666	58,4736	58,6362	41,5264	41,3638	0,1626	34,0263	65,9737
Recorte 12	33,5744	87,2416	77,3034	12,7584	22,6966	9,9382	66,497	33,5030
Recorte 13	19,8232	92,3919	61,3357	7,6081	38,6643	31,0562	59,2365	40,7635
Recorte 14	40,5012	82,6993	85,9767	17,3007	14,0233	3,2774	73,1271	26,8729
Recorte 15	71,2604	91,9931	76,1594	8,0069	23,8406	15,8337	70,5118	29,4882
Recorte 16	59,5695	95,3731	67,4131	4,6269	32,5869	27,9600	66,4903	33,5097
Recorte 17	69,6787	94,3326	95,0538	5,6674	4,9462	0,7212	89,9725	10,0275

¹Porcentagem de células não avaliadas, considerando as *layers* e as molduras da figura que não compreendem território. Números apresentados com quatro casas decimais.

²Diferença entre o percentual real e o simulado.

Tabela 6.4: Síntese dos resultados do Experimento 2 para os 17 recortes.

Quantificação da mudança ¹	Alocação da Mudança ²
Acerto médio =	Média de <i>hits</i>
73,2%	52,8%

¹Erro médio para os 17 recortes = 26,8%.

²Média de *misses* = 47,1%.

Observa-se um comportamento bem diverso entre os recortes simulados, com simulações bem condizentes com o real e outras bem distantes da realidade. Com os recortes escolhidos de maneira aleatória, sem nenhum estudo prévio, os resultados médios, apresentados na Tabela 6.4 foram regulares, com taxa de quantificação de mudança próximo ao esperado e alocação de mudanças bem aquém do previsto, com desempenho pouco melhor do que uma alocação completamente aleatória.

Entretanto, uma análise mais profunda aponta as causas para esse desempenho. Analisando exclusivamente a taxa de quantificação da mudança para cada um dos 17 recortes, é possível notar que em alguns deles (recortes 4, 7 e 10), a ação dos agentes agricultores e pecuaristas foi nula, impactando o resultado médio do experimento. Mesmo sendo alocados, os agentes não exploraram nem uma célula sequer nessas simulações. O estudo das regras e comportamento dos agentes explica tal fato. O modelo definido aponta que nas zonas urbanas e de unidades de conservação do PDOT não é permitido a exploração para tipos de uso da terra como agricultura e pecuária. Os agentes foram coibidos de explorar a terra por um comportamento pré-determinado do modelo. Embora o zoneamento seja um instrumento de organização do território, de modo geral, na prática não há obstáculos reais que impeçam uma exploração eventual por algum outro tipo de uso. Os agentes atuaram conforme o seu rol de comportamentos, produzindo resultado bem diverso do real. Esse fato evidencia a necessidade de um modelo robusto e bem estruturado. Com os resultados do Experimento 2, fica evidente a necessidade de alteração desse padrão de resposta dos agentes.

Não obstante a existência de transformação do uso da terra para os recortes 4, 7 e 10, entre os anos de 2002 e 2008, esse se deve, principalmente, à ação de agentes urbanizadores. Conforme ilustrado na Figura 6.14, para os recortes 7 e 10 é possível divisar a intensa ocupação urbana, com evidentes edificações, ruas e rodovias. A transformação dessa área pode ter sido consequência da expansão urbana, fato que não é considerado no estudo de caso, devido a ausência da implementação da tipologia de agente urbanizador. Do mesmo modo, o recorte 4 representa área entre unidades de conservação, sendo mapeada pelo PDOT como área para usos de conservação. Ainda que uma lei impulse a conservação, já é consolidado nessa área algumas explorações da terra, que não foram retradas pela ferramenta por ela implementar literalmente as intenções do PDOT, descritas no modelo.

Se subtrairmos apenas os recortes 4, 7 e 10 da análise final, sob a justificativa de que os agentes agiram conforme o definido pelo modelo e com a ressalva que é patente a necessidade de implementação das tipologias urbanizadora e conservacionista, obtemos resultados expressivamente melhores, conforme apresentado na Tabela 6.5.

Em relação à alocação da mudança, conclui-se do Experimento 2 que há a necessidade de uma simulação única para todo o território descrito no modelo. Evidenciam-se nesse experimento, os problemas provenientes do trabalho com recortes. A alocação arbitrária

Tabela 6.5: Resultados do Experimento 2, desconsiderando os recortes 4, 7 e 10.

Quantificação da mudança	Alocação da Mudança
Acerto médio =	Média de <i>hits</i>
85,1%	60,4%

de um número de agentes de tipologias pré-estabelecida para todos os recortes é um dos fatores que explica as taxas significativas de *misses*. A visão estanque do território também não contribui para um melhor desempenho da ferramenta. Supondo que um agente agricultor fosse alocado em determinado espaço, conforme os critérios estabelecidos para o modelo, perto da borda do recorte. O recorte ao lado pode ser muito mais atrativo para esse agricultor, que no mundo real poderia migrar para essa localização. Entretanto, com a visão segmentada dos recortes, o agricultor se vê obrigado, pelas definições da ferramenta, a explorar aquele recorte. Essas diretrizes inevitavelmente irão resultar em altas taxas de erros.

Para uma melhor compreensão dos processos de alocação de mudança para esse experimento, foram geradas imagens comparativas, para cada um dos recortes, de modo que fosse possível identificar explicitamente quais são os pontos no espaço que foram transformados de maneira diversa no mundo real e na simulação. Desse modo, a imagem final de cada simulação dos recortes recebeu um tratamento de modo a ser possível identificar, por meio de cores, quais são as similitudes com a imagem real do ano de 2008. A representação da cor vinho (RGB 139-69-19) identifica as áreas que deveriam ser preservadas mas que foram exploradas pela simulação. Já a cor lilás (RGB 188-145-143) foi designada para ilustrar as áreas que foram exploradas na realidade, mas que mantiveram-se preservadas na simulação. As imagens podem ser conferidas nas Figuras 6.15, 6.16, 6.17.

Percebe-se, de modo geral, que as áreas exploradas da simulação seguem as feições das variáveis proximais, percorrendo a extensão de rodovias, hidrovias, entre outros. Isso acaba resultando em uma exploração linear, não em blocos, como seria de se esperar de um estabelecimento do agronegócio. Essa observação pode ser facilmente conferida no recorte 3 da Figura 6.15. Nota-se que a área na cor vinho concentra-se em faixa que acompanha rodovias, exemplificando o comportamento de estímulo definido para essas variáveis. Já a identificação lilás concentra-se nas proximidades das rodovias, mas com extensões para o interior. Faz-se necessário alguns ajustes na função de *patch*, ou seja, na função que incentive a formação de manchas de exploradores, ao invés de trajetos de exploração lineares.

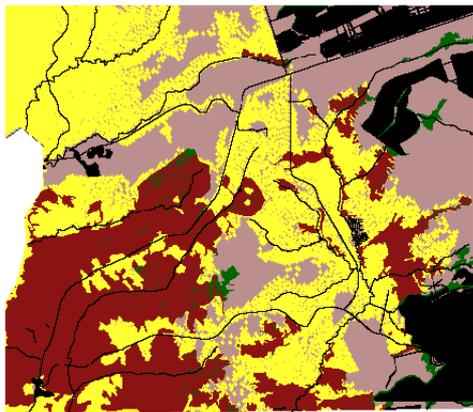
Além disso, a alocação obrigatória de um mesmo número de agentes para cada um dos recortes, acaba resultando em inconsistências como, por exemplo, a sobrelotação de agentes competindo por um espaço ínfimo, como no recorte 1, ou uma área disponível para exploração mas com um número reduzido de agentes, como o recorte 16. A proposta de alocação de diferentes agentes para cada recorte, deve ser considerada para a melhoria dos resultados.



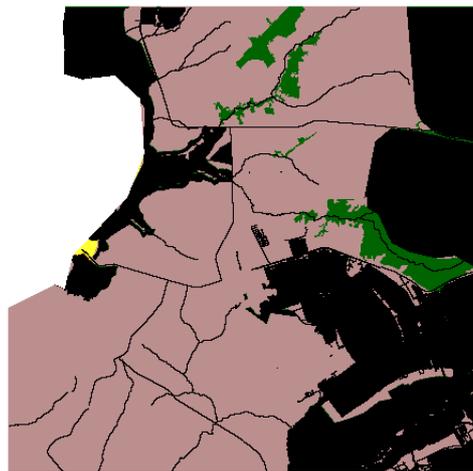
(a) Recorte 0



(b) Recorte 1



(c) Recorte 3



(d) Recorte 4

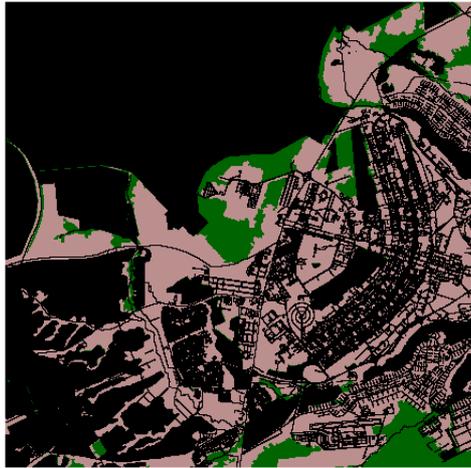


(e) Recorte 5

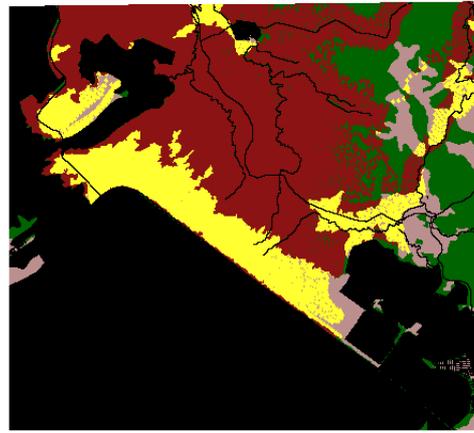


(f) Recorte 6

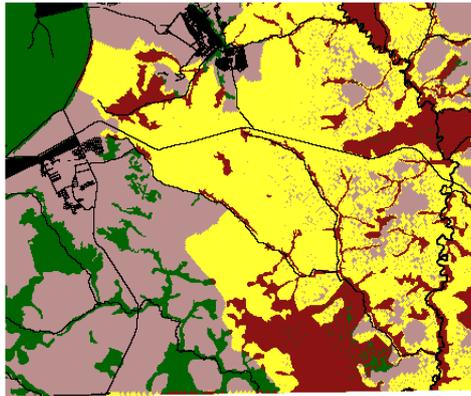
Figura 6.15: Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 0 a 6.



(a) Recorte 7



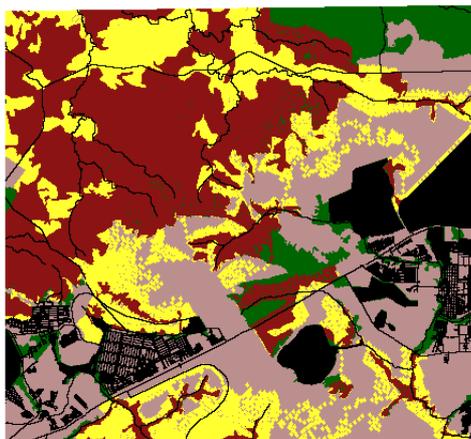
(b) Recorte 8



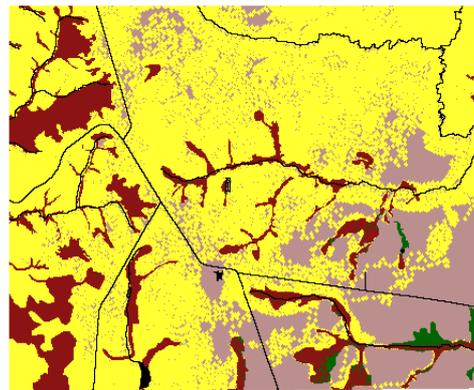
(c) Recorte 9



(d) Recorte 10

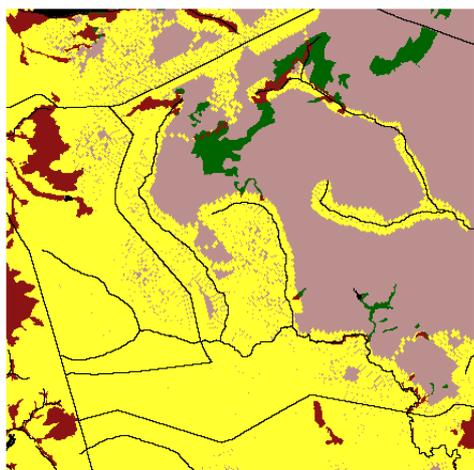


(e) Recorte 11

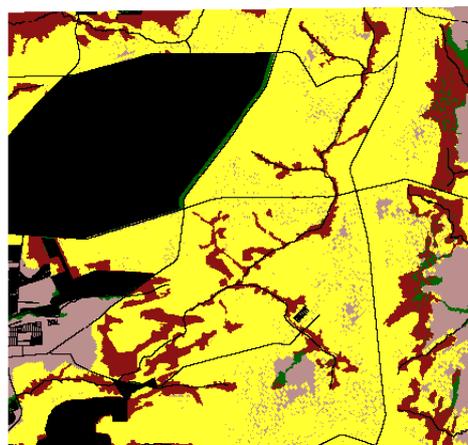


(f) Recorte 12

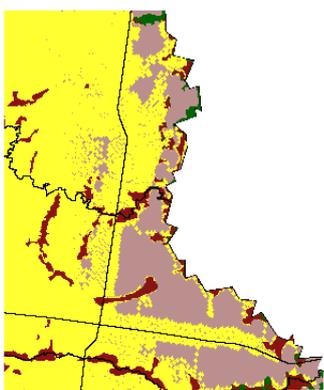
Figura 6.16: Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 7 a 12.



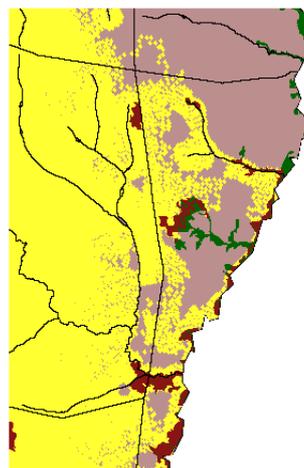
(a) Recorte 13



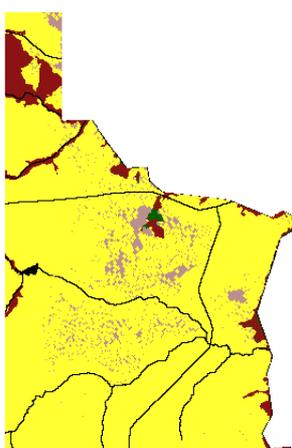
(b) Recorte 14



(c) Recorte 15



(d) Recorte 16



(e) Recorte 17

Figura 6.17: Análise da alocação de mudança para o Experimento 2. Recortes 13 a 17.

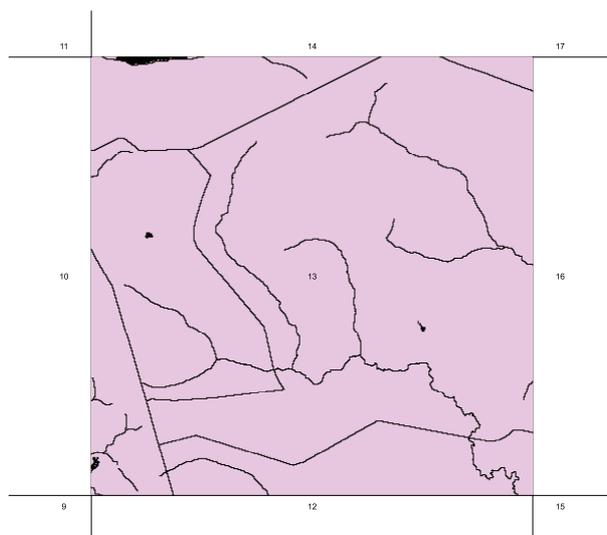


Figura 6.18: Detalhes do recorte 13 e suas variáveis proximais.

6.2.3 Experimento 3

Com o objetivo de analisar a quantidade ideal de agentes para a simulação, o Experimento 3 foi realizado. Com ele, buscou-se investigar a primeira proposta empírica do estudo de caso, que definia o número arbitrário de 20 agentes da tipologia agricultor e 20 agentes pecuaristas como a população inicial e responsável pela transformação da terra.

Para isso, um recorte proveniente do Experimento 2 foi escolhido para essa análise. O recorte 13 (Figura 6.18) foi uma das simulações que apresentou desempenho satisfatório mas não ideal. Pela sua localização no espaço e pelo seu zoneamento evidenciar o estímulo à agricultores e pecuaristas, foi selecionado para o Experimento 3.

O experimento consistiu em simular o estudo de caso para o recorte, variando o parâmetro do número de agentes para as seguintes quantidades:

- 10 agentes de cada tipologia (20 no total);
- 20 agentes de cada tipologia (40 no total);
- 30 agentes de cada tipologia (60 no total);
- 40 agentes de cada tipologia (80 no total);
- 45 agentes de cada tipologia (90 no total);
- 50 agentes de cada tipologia (100 no total);
- 80 agentes de cada tipologia (160 no total).

Os resultados são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Resultados do Experimento 2 para a simulação dos 17 recortes.

	Posições Ignoradas ¹	Quantificação da Mudança				Erro ¹ (%)	Alocação da Mudança	
		Exploração no mapa real (%)	Exploração no mapa simulado (%)	Preservação no mapa real (%)	Preservação no mapa simulado (%)		Qtde de <i>hits</i> <i>misses</i> (%)	Qtde de
10 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	60,7450	7,6081	39,2550	31,6469	58,3424	41,6576
20 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	61,3356	7,6081	38,6644	31,0563	59,2365	40,7635
30 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	65,5324	7,6081	34,4676	26,8595	63,2470	36,7530
40 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	75,7906	7,6081	24,2094	16,6013	70,4990	29,5010
45 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	65,8100	7,6081	34,1900	26,5819	64,2381	35,7619
50 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	63,4203	7,6081	36,5797	28,9716	63,5430	36,4570
80 agentes por tipologia	19,8232	92,3919	69,1584	7,6081	30,8416	23,2335	68,0307	31,9396

¹Diferença entre o percentual real e o simulado.

Pela análise da tabela é possível visualizar que o aumento da taxa de acerto tanto da quantificação da mudança quanto da alocação da mudança, para o conjunto de simulações, aumenta à medida que aumenta o número total de agentes. Isso acontece progressivamente com as simulações com 10, 20, 30 e culmina com 40 agentes por tipologia. Nessa simulação, o experimento atingiu seu ponto máximo entre as quantidades de agentes fornecidas como parâmetro, apresentando taxa de acerto de quantificação de mudança de **83,4%** e taxa de acerto de alocação de mudança (*hits*) de **70,5%**. Percebe-se uma queda dos resultados da simulação com o aumento do número de agentes de 40 para 45 por tipologia. Do mesmo modo, há também queda de rendimento para a simulação com 50 agentes por tipologia. É possível inferir que, para o recorte 13, 40 agentes por tipologia (ou seja, 80 agentes transformadores) é o ideal para a representação das transformações que ocorreram durante o período 2002 - 2008.

Uma ligeira queda no erro é percebida quando são simulados 80 agentes por tipologia (160 agentes transformadores). Se outras simulações fossem realizadas na sequência, com 90, 100 agentes por tipologia, possivelmente seria obtido um novo aumento progressivo das taxas de acerto. Entretanto, atribui-se essa melhora dos resultados à exploração em massa do recorte, devido ao excesso de agentes transformadores.

Investigações futuras devem ampliar esse experimento para verificar se o pico obtido com 40 agentes por tipologia é um máximo global ou local. Estima-se, também, que cada área de simulação, dependendo de suas características, vá possuir um número de agentes transformadores para o qual o desempenho da simulação é máximo. Experimentos posteriores devem identificar qual o número ideal e agentes para o total da área simulável. Se a área é dividida em recortes, a média dos números ideais de cada segmento deve ser encontrado para avaliação da ferramenta.

6.2.4 Experimento 4

Após o Experimento 3, optou-se pela repetição da simulação novamente dos 17 recortes definidos para representar a área definida pelo estudo de caso. A única alteração em relação ao Experimento 2 é a alteração do parâmetro que define o número de agentes por tipologia. No Experimento 2, a simulação foi executada com 20 agentes por tipologia. No Experimento 4, agora relatado, o parâmetro foi ajustado para 40 agentes por tipologia. Os resultados observados e a comparação com o Experimento 2 são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Resultados do Experimento 4 para a simulação dos 17 recortes.

	Posições Ignoradas	Quantificação da Mudança				Alocação da Mudança			Comparação ¹	
		Exploração real (%)	Exploração simulada (%)	Preservação real (%)	Preservação simulada (%)	Erro	Qtde hits(%)	Qtde misses(%)	Melhoria erro	Melhoria hits
Recorte 0	98,9040	82,9988	93,5458	17,0012	6,4542	10,5470	76,6234	23,3766	0,0787	0,1574
Recorte 1	98,0957	100,0000	99,9773	0,0000	0,0226	0,0227	99,9773	0,02265	-0,0227	-0,02265
Recorte 3	38,9139	70,8781	75,1352	29,1219	24,8648	4,2571	49,0538	50,9462	-1,8564	5,2852
Recorte 4	55,0009	93,9469	0,21663	6,0531	99,7834	91,7806	6,2487	93,7513	0,0192	0,0019
Recorte 5	66,8948	71,4401	66,4096	33,5904	43,0835	18,9997	47,8951	52,1049	-4,4761	7,5595
Recorte 6	44,1762	53,5666	19,4704	46,4334	80,5296	34,0962	34,4130	65,5870	0,4420	2,1727
Recorte 7	72,5643	78,5527	0,2326	21,4473	99,7673	76,2259	21,6706	78,3294	2,3268	0,22325
Recorte 8	62,6954	30,7595	80,5751	69,2405	19,4249	49,8156	36,0991	63,9009	-8,6290	-3,6063
Recorte 9	34,7028	73,0284	60,7715	26,9716	39,2285	12,2569	58,3123	41,6877	6,7239	5,6498
Recorte 10	32,8200	75,0388	1,9743	24,9612	98,0257	73,0645	24,6151	75,3849	1,9743	-0,34607
Recorte 11	35,2666	58,4736	71,792	41,5264	28,2080	13,3184	37,1434	62,8566	-13,15558	3,1170
Recorte 12	33,5744	87,2416	81,9157	12,7584	18,0843	5,3259	70,4210	29,5790	4,6123	3,9240
Recorte 13	19,8232	92,3919	67,1786	7,6081	32,8214	25,2133	66,4707	33,5293	5,8429	7,2342
Recorte 14	40,5012	82,6993	89,5014	17,3007	10,4986	6,8021	74,3044	25,6956	-3,5247	1,1773
Recorte 15	71,2604	91,9931	92,8291	8,0069	7,1709	0,8380	85,6236	14,3764	14,9957	15,1118
Recorte 16	59,5695	95,3731	87,8817	4,6269	12,1183	7,4914	84,8102	15,1898	20,4686	18,3199
Recorte 17	69,6787	94,3326	98,5960	5,6674	1,4040	4,2634	93,1135	6,8865	-3,5422	3,1410

¹Comparação entre os resultados do Experimento 4 (simulação com 40 agentes/tipologia) e Experimento 2 (simulação com 20).

Tabela 6.8: Resultados do Experimento 4 e comparação com o Experimento 2.

	Quantificação da mudança	Alocação da Mudança
Experimento 4 ¹	Acerto médio = 74,5%	Média de <i>hits</i> =56,9%
Experimento 2	Acerto médio = 73,2%	Média de <i>hits</i> =52,8%
	Melhoria= 1,3%	Melhoria= 4,1%

¹Se forem desconsiderados os recortes 4, 7 e 10, por justificativa idêntica à indicada para o Experimento 2, têm-se Acerto médio=86,2%, Média de *hits*=65,3%, com melhorias de 1,1% e 4,98%, respectivamente, em relação ao resultado análogo encontrado no Experimento 2.

Observa-se que há variância entre os resultados obtidos. Alguns recortes permaneceram quase inalterados, enquanto outros tiveram ligeira queda de desempenho, em relação ao Experimento 2. Entretanto, em algumas simulações, como por exemplo para os recortes 15 e 16, foi notada expressiva melhora com a alteração da configuração do número de agentes transformadores. Esses indícios, por recorte, ilustram quais são as áreas que apresentam maior oferta do que demanda de transformação do uso da terra. A síntese dos resultados pode ser conferido na Tabela 6.8.

A esquematização dos resultados gerais dos experimentos 1, 2 e 4 pode ser conferido na Figura 6.19. Na média, percebe-se a melhoria sutil dos resultados, principalmente no quesito de alocação de mudança, com mais de 4% de melhoria. Os dados revelam que ainda é preciso muita calibração para conseguir uma melhora significativa de resultado. Entretanto, os dados são animadores quando constata-se que foi possível melhorar em 4% a validação qualitativa da simulação pelo ajuste de um único parâmetro. Considerando que o mesmo exercício pode ser realizado para outras configurações, como o potencial de exploração de cada agente transformador, a resolução espacial, entre outras, pode-se admitir que para cada modelo será possível calibrar os parâmetros para que a ferramenta forneça o melhor resultado possível.

6.3 Discussão dos Resultados

Após os experimentos e apresentação dos resultados, alguns tópicos são relevantes para análise e discussão. A discussão dividi-se em três grandes grupos, abordando as características gerais da ferramenta, análises acerca da quantificação da mudança e da alocação de mudança.

6.3.1 Características Gerais

A ferramenta, de modo geral, apresenta o comportamento esperado. Todas as funcionalidades implementadas foram exploradas em algum dos experimentos e tiveram execução conforme previsto. A utilização do *framework* JADE para a implementação do SMA facilita a utilização dessa metodologia por fornecer toda a estrutura de organização, contêineres, comunicação e interação necessárias para a implementação do projeto proposto. É também vantagem por fornecer todos esses recursos padronizados com as boas práticas internacionais de programação de agentes inteligentes. A flexibilidade fornecida pela linguagem JAVA também mostrou-se útil para a aplicação proposta, permitindo que recursos disponíveis em bibliotecas diversas fossem integrados.

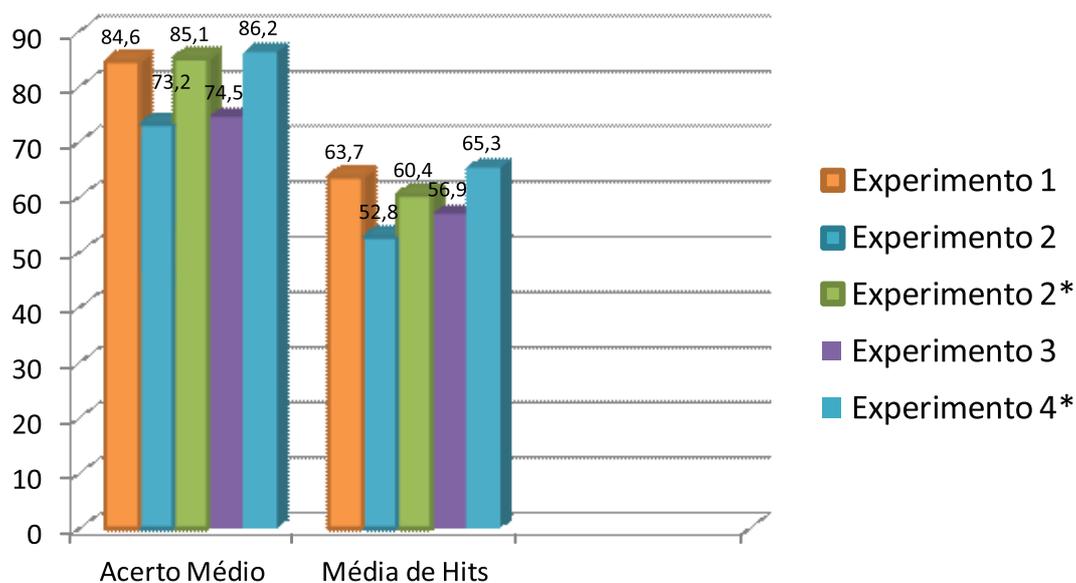


Figura 6.19: Comparação dos resultados dos Experimentos 1, 2 e 4, em porcentagem.*Resultados que desconsideram os recortes 4, 7 e 10.

A utilização do Matlab para a execução do pré-processamento das imagens de entrada e variáveis proximais e políticas, bem como para a renderização das imagens finais resultantes da simulação, mostrou-se adequada para as necessidades iniciais da pesquisa. Entretanto, a exigência de instalação de um *software* adicional, bem como o *overhead*⁷ computacional advindo dessa escolha de projeto, já apontam que outras alternativas deverão ser exploradas para a manipulação de imagens em versões futuras da ferramenta MASE, conforme identificado doravante na Seção 7.1.

Para o usuário final, principalmente para os leigos em computação, a manipulação de imagens e renderização devem, obrigatoriamente, serem transparentes ao processo de simulação. A restrição da utilização da ferramenta MASE associada à outros *softwares*, como o Matlab, pode ser fator negativo de avaliação ou mesmo de recusa de utilização da ferramenta proposta.

O fator mais impactado pela utilização do MATLAB, além da usabilidade, é o desempenho. Apesar dos tempos de simulação descritos nos experimentos serem aceitáveis para as necessidades dos usuários comuns, é notável a demanda computacional mesmo para uma simulação simples. A alta demanda por memória e processamento, oriunda da utilização do Matlab, é um dos fatores impactantes no desempenho geral da ferramenta, mas não é o único.

A resolução espacial definida para o modelo é o fator que mais impacta a performance da ferramenta. A resolução espacial foi o fator impeditivo de um experimento que simulasse, em um único recorte, todo o território do DF. Para a área do recorte dos Experimentos 2 e 4, por exemplo, cada recorte possui uma área total de 48.400ha,

⁷Qualquer processamento ou armazenamento em excesso, seja de tempo de computação, de memória, de largura de banda ou qualquer outro recurso que seja requerido para ser utilizado ou gasto para executar uma determinada tarefa. Como consequência pode piorar o desempenho do equipamento ou programa.

sendo necessários 193.600 agentes espaciais, cada um representando um espaço de $50 \times 50m$. Como cada agente é uma entidade de *software*, provido de autonomia, relações de interação, coordenação e comunicação, há considerável complexidade computacional embutida em cada uma dessas entidades. O grande número de agentes influencia, assim, na grande demanda por recursos computacionais.

A implementação local da ferramenta MASE é gargalo já identificado, sendo impeditiva para torná-la escalável e funcional para qualquer extensão do território ou para simulações em qualquer resolução espacial. Testes foram realizados em computadores de maior capacidade (Memória DDR3 8GB e Processador Intel Core I5 2500 Socket LGA 1155 3.3GHz) e apresentaram considerável melhoria de desempenho em comparação às máquinas padrão utilizadas para teste. Entretanto, como o público-alvo da ferramenta não dispõe, ordinariamente, de supercomputadores, torna-se premente o investimento em desempenho para a próxima versão da ferramenta. A implementação da ferramenta MASE de maneira distribuída é citada na Seção 7.1.

É sabido que as decisões de projeto do modelo são as que mais influenciam na atuação da MASE. Melhores resultados em tempo de simulação, bem como em espaço simulado podem ser obtidos com alterações de configurações. A medida imediata para a melhoria da resposta da ferramenta seria a adoção de nova resolução espacial para o modelo, reduzindo drasticamente o número de agentes espaciais por recorte. Seria possível, assim, tornar a ferramenta mais rápida para os recortes pré-definidos. Ao optar por manter o tempo de simulação e o número aproximado de células, seria possível ampliar a extensão da simulação para todo o DF, por exemplo.

Essas decisões de projeto do modelo necessitam de estudo para verificação da alteração de cada uma dessas variáveis. O usuário, propósito do modelo, deve calcular a melhor configuração de parâmetros para a investigação que capitaneia, devendo avaliar os erros associados à adoção desta ou daquele tamanho de células, uma vez que todo o conjunto de imagens do modelo devem estar na mesma resolução. Uma alternativa fácil de contornar o problema da resolução espacial é fornecida naturalmente pelo SMA. Como foram definidos agentes espaciais e estes são antes desconectados da imagem de entrada em si, é possível determinar que um agente espacial, ou célula, é um agrupamento de *pixels* do tamanho desejado pelo usuário. A Figura 6.3 apresenta a decisão de projeto de considerar uma célula como uma matriz 2×2 de *pixels*. O usuário pode definir uma matriz de qualquer tamanho, sem alterar a resolução do conjunto de imagens que alimenta a ferramenta.

A decisão de adotar no modelo uma resolução de $50 \times 50m$ para o *pixel*, provendo a simulação da dinâmica do uso e cobertura da terra em tamanho detalhe, teve o propósito de testar o comportamento da ferramenta para coordenar a miríade de agentes resultantes dessa decisão. Apesar de ser possível aumentar o tamanho da célula sem prejuízos para o modelo, optou-se por explorar os limites da ferramenta MASE.

A comparação com as demais ferramentas abordadas no Capítulo 4 é apresentada na Tabela 6.9. Nota-se que a ferramenta MASE apresenta as características usuais presentes nas ferramentas comerciais e de pesquisa, inovando na hierarquia da ferramenta, bem como consolidando forte presença na modelagem da tomada de decisão humana.

Tabela 6.9: Características gerais e tecnologia das ferramentas

Ferramenta	Tipo de modelo	Tecnologia	Hierarquia	Complexidade Temporal	Complexidade de Tomada de Decisão
Dinâmica EGO	Modelos espaciais	Autômato dinâmicos	<i>top-down</i> Celular	Intervalo de tempo entre a imagem inicial e final	Nível 2. Relacionada ao tamanho da população
IDRISI	Modelo espacial de Markov	Autômato Celular	<i>top-down</i>	Determinada pelo usuário	Nível 1. Somente variáveis biofísicas
CORMAS	Simulações Multiagentes	Sistema Multiagente	<i>bottom-up</i>	Determinada pelo usuário	Nível 5. Variável conforme o comportamento dos agentes
CLUE	Modelo de estado finito	Matrizes de conversão	<i>top-down</i>	Determinada pelo usuário	Nível 4. Função de probabilidade com variáveis socioeconômicas
MASE ¹	Simulação Multiagentes	Sistema Multiagente	híbrida	Determinada pelo usuário	Nível 5. Variável conforme o comportamento dos agentes

¹ Considera-se as informações temporais e espaciais do estudo de Caso do DF, uma vez que essas informações são configuráveis pelo usuário.

6.3.2 Quantificação da Mudança

Em relação a quantificação da mudança, os resultados foram, de maneira geral, positivos. Observa-se a dependência desses resultados em relação aos parâmetros adotados para o modelo. Pela comparação dos resultados dos experimentos, principalmente do Experimento 3, nota-se que a quantidade dos agentes transformadores afeta diretamente a quantidade de recursos explorada. Aparentemente, percebe-se um ponto ótimo de exploração para cada recorte, expresso pelo número de agentes agricultores e pecuaristas. Após esse ponto ótimo, há um decréscimo na quantidade explorada, seguido por novo aumento, este devido à exploração por “força bruta”, resultante do excessivo número de agentes.

Não havia a pretensão de resultados condizentes 100% com a realidade. Já era esperado um número aproximado para a taxa de mudança devido as incertezas inerentes à modelagem. Entretanto, a implementação exclusiva das tipologias Agricultor e Pecuarista distanciou as simulações de um retrato mais fiel da realidade. A exclusão das tipologias Urbanizador e Conservacionista para o estudo de caso do DF deve ser considerada da interpretação dos resultados obtidos. Apesar de estarem previstos no modelo teórico (ver Seção 5.2), o não desenvolvimento dessas tipologias ocorreu unicamente por decisão do projeto, uma vez que seriam necessárias apenas duas tipologias (no caso, definidas como Agricultor e Pecuarista), com regras e mudanças de estado definidas, para testar as funcionalidades e implementações da ferramenta MASE. Como o DF possui pelo menos 17% (dados de 2008) de seu território ocupado por áreas urbanizadas, é expressiva a ausência do agente Urbanizador. Conforme análise do Experimento 2, é patente que a inexistência de um agente urbanizador em determinados recortes fez com que os resultados fossem severamente afetados. Como o zoneamento do PDOT determina áreas de utilização unicamente urbana, com a definição de regras impeditivas da ação de outras tipologias no modelo, o resultado ruim nesses recortes já era esperado e reflete unicamente o conjunto de definições adotadas. Uma alteração na regra de interpretação do PDOT pode ser vislumbrada, transformando o zoneamento do Plano Diretor em uma indicação ou sugestão das possíveis destinações do uso da terra, divergindo do caráter determinístico e absoluto que configura o modelo atual. Desse modo, mesmo que improvável a exploração de um agente pecuarista em uma área de expansão urbana, isto não seria impossível (que, em suma, é como está programado o modelo proposto).

Outro fator que afeta a taxa de mudança no uso e na cobertura da terra é o atributo que configura o potencial de exploração de cada agente transformador. Esse número é determinado arbitrariamente na configuração do modelo descrito nesse trabalho, e pode se inferir que essa variável possui um comportamento análogo ao número de agentes exploradores, ou seja, quanto maior o potencial de exploração por agente, maior a taxa de mudança por *step* e, por conseguinte, maior a taxa de mudança total da simulação.

Um estudo mais criterioso é necessário para correlacionar esse número absoluto ao potencial de recursos da terra encontrado na realidade, de modo a justificar esse parâmetro de maneira menos artificial. Uma possibilidade já aventada e parcialmente projetada é a definição de cenários por meio da configuração desse parâmetro. Por exemplo, seria possível, pela alteração desse atributo, simular três cenários possíveis para o DF: um cenário tendencial (ou *business-as-usual*) que refletiria o ritmo da exploração como ele é percebido, um cenário degradativo (ou pessimista) que o potencial de exploração seria superior ao do cenário tendencial (por exemplo, exploração de 500 unidades por *step* para cada agente agricultor) e, finalmente, um cenário conservacionista (ou otimista), em que

a taxa de exploração seria menor do que a normalmente registrada. A exploração de diferentes cenários pela alteração de parâmetros pode representar diferentes hipóteses no modelo, supondo que novas legislações, técnicas de cultivo/exploração ou a difusão de processos de educação ambiental poderiam influenciar a dinâmica de uso e ocupação da terra.

Uma discussão acerca da variabilidade de comportamentos por agentes e tipologias também se faz necessária para a análise da quantificação da mudança no uso e cobertura da terra. Como definido no modelo e implementado na ferramenta, não há variabilidade dentro de uma mesma tipologia. Todos os agentes agricultores possuem o mesmo exato comportamento. Um passo que certamente tornaria o modelo mais factível, e por conseguinte mais complexo, seria a implementação de diferenças entre agentes de mesma tipologia. Seria possível, por exemplo, implementar atores com potencial de exploração diferentes dentro do grupo de agricultores, o que refletiria a diversidade dessa classe de agentes, permitindo captar comportamentos de agricultores familiares e de grandes monoculturas. Do mesmo modo, a variação da percepção da vizinhança poderia ser configurável, simulando também a variabilidade aí existente. Por exemplo, uma grande agricultor pode instalar sua propriedade no local de melhor subsídios, portanto tem uma visão mais ampla da vizinhança do que o agricultor de pequeno porte, que está confinado à terra que herdou. A variabilidade dentro de cada tipologia é suportada pela técnica de SMA, sendo somente necessária a definição conceitual dessas diferenças no modelo para a sua implementação.

Em relação à alocação da mudança, destacam-se alguns tópicos. A divisão do espaço total a ser simulado em recortes é altamente impactante para a correta alocação da mudança. Os limites pré-determinados restringem a visão dos agentes do ambiente ao seu redor, não considerando-o como espaço contínuo. O local mais adequado para a inicialização ou para o deslocamento do agente pode estar imediatamente ao lado, mas fica inacessível pelo recorte. A simulação de um único espaço, sem a fragmentação, resultaria em padrões de mudança mais próximos a realidade.

Outra questão surge também em consequência dos recortes. A obrigatoriedade de alocação de um número determinado de agentes em cada recorte, aumenta o erro inerente ao modelo e aos resultados apresentados pela ferramenta. É possível que, pela análise global do espaço, o grupo de agentes pecuaristas fossem mais aptos a explorar uma determinada região *A*. Entretanto, como a região não está disponível pela limitação do recorte, esse grupo de agentes deverá explorar outro local, não o que inicialmente seria mais ideal. O problema de falta de exploração de alguns recortes pela ausência do agente urbanizador reflete também esse problema. Se tivessem a noção contínua do espaço, os agentes agricultores e pecuaristas não ficariam na inação, presos em um recorte onde não é possível explorar.

Uma solução paliativa pode ser implementada em SMA. Se a extensão do modelo pretendido for grande a ponto de que a divisão em recortes seja inevitável, é possível, pelos agentes gerentes, alocar os agentes transformadores antes do início da simulação. Isso permitiria que o grupo de agentes transformadores avaliasse o espaço como um todo e fossem alocados nos locais de maior utilidade. Um recorte *A* poderia ter 10 agentes agricultores e 3 pecuaristas, enquanto um recorte *B* poderia ter 70 agentes pecuaristas e nenhum agricultor. A divisão em recortes seria unicamente para dividir a carga computacional da simulação. Ainda haveria o problema do agente, uma vez alocado em um recorte, não

poder migrar para o outro ao lado, mas esse já seria um melhoramento considerável em relação à implementação atual.

6.3.3 Alocação da Mudança

Um outro tópico a ser discutido é o caráter determinístico da alocação de mudanças. Atualmente, os agentes são inicializados em locais de maior função de utilidade, que é uma medida em função do posicionamento das variáveis proximais e das relações de estímulo para cada uma das tipologias de agente. O objetivo de alocar os agentes nos locais de maior utilidade é garantir que a exploração se dê nos espaços mais propensos às respectivas utilizações da terra. Entretanto, a realidade não é assim tão objetiva. Muitas vezes é possível que existam agricultores e pecuaristas que transformam a terra nas áreas que o modelo consideraria altamente improvável. Isso pode se dar pela distribuição de terra ou pela falta de recursos do agente transformador em migrar para um local que o modelo considera “melhor”. Mesmo longe do ideal, aquela pode ser a área herdada pelo agricultor e por isso, e por nenhum outro motivo, ele explora a área que possui. Essas sutilezas não são admitidas no modelo atual. Alguns comportamentos de alocação da terra, que terminam a simulação sendo bem diferentes do padrão real observado, podem ser explicados por esses fenômenos, presentes normalmente na exploração da terra, mas não mensuráveis pelo modelo. Uma saída passível de implementação é a associação da função de utilidade à uma variável de probabilidade. Não confundir essa probabilidade referida com os mapas de probabilidade comuns aos modelos de Markov e aos autômatos celulares. A função dessa variável de probabilidade seria como jogar um dado antes de alocar o agente. Os pontos com altas funções de utilidade têm necessariamente altas probabilidades. Entretanto, seria possível por meio desse “jogar de dados”, permitir que o agente fosse alocado em local diferente do ideal. O comportamento observável poderia ser comparado ao existente na realidade, onde é possível que o local mais adequado para a transformação da terra pelo agente seja a área x , mas por algum motivo excuso, ele opta por transformar a área y .

A implementação dessas mudanças simples poderá melhorar os resultados encontrados nos experimentos para a alocação de mudanças. Um estudo mais criterioso de como cada uma dessas variáveis de comporta, em conjunto com a calibração de parâmetros, pode refinar ainda mais a alocação das mudanças de uso e cobertura da terra para o modelo simulado.

Com base nessa discussão geral sobre os resultados e características da ferramenta, é possível ter as bases para a análise das contribuições do trabalho proposto, das lições aprendidas e dos trabalhos futuros que podem advir da continuidade da pesquisa. Algumas dessas questões são abordadas no capítulo seguinte.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Esse projeto de pesquisa propôs o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação com abordagem de SMA híbrida, para analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra. Assim, implementou-se a ferramenta MASE - *MultiAgent System for Environmental simulation*, juntamente com um modelo básico para a descrição dos fenômenos LUCC aplicados ao bioma Cerrado, tendo como estudo de caso o Distrito Federal. A ferramenta tem a finalidade de explorar cenários alternativos e investigar hipóteses para subsidiar propostas de políticas públicas de gestão ambiental.

Foram revisados os conceitos norteadores da pesquisa na área do uso e cobertura da terra, além de detalhadas as principais características, metodologias e definições de modelagem LUCC, especificamente a modelagem baseada em indivíduos para modelos espacialmente explícitos. Além disso, uma breve visão geral do bioma Cerrado e das principais características da dinâmica de seu uso e ocupação foram apresentadas. Esse conhecimento era primordial para que a ferramenta proposta pudesse retratar as questões essenciais dessa área de pesquisa. As discussões apresentadas no Capítulo 2 tinham por plano de fundo a compreensão de que o Cerrado enfrenta uma intensificação dos processos de fragmentação e intensificação do uso da terra, sendo necessárias medidas de controle para reverter esse quadro. Uma nova dinâmica de proposição de políticas ambientais pode ser obtida com o envolvimento do tomador de decisão por meio dos modelos e das simulações computacionais. Entretanto, é claro que para alterar o panorama atual de “celeiro brasileiro” do Cerrado é necessário uma alteração do paradigma vigente de ocupação e utilização da terra nesse bioma, perpassando fatores ambientais, sociais e econômicos.

Foram reproduzidos também, as principais diretrizes do estudo dos Sistemas Multiagentes, as bases teóricas e as normas metodológicas, bem como o ferramental disponível para ser utilizado na pesquisa. Os estudos realizados apontam SMA como uma iniciativa emergente e promissora, destacando o papel chave da Ciência da Computação para o fortalecimento da interdisciplinaridade com as Ciências Ecológicas. Uma ferramenta de simulação baseada em agentes contribui para a área de IA e SMA por reproduzir o conhecimento e o raciocínio de agentes heterogêneos, coordenados de forma integrada para que problemas de gestão sejam resolvidos. A área das Ciências Ecológicas também pode explorar a dinamicidade que advém da abordagem de SMA para representar os problemas complexos, inerentes ao meio ambiente. Pela análise da dinâmica de uso e de ocupação da terra por meio de agentes inteligentes é possível investigar a implicação de diferentes

estratégias de conservação, gestão e/ou planejamento ambiental.

A síntese de alguns conceitos do Processamento Digital de Imagens também foi necessária, uma vez que partes da solução proposta requeriam conceitos básicos, além das noções necessárias para a programação e projeto de modelos espacialmente explícitos. A manipulação e o tratamento das imagens para o modelo e a ferramenta é tarefa delicada pois é o ponto de união entre o usuário e o *software* proposto. O modo como se dá essa interação e as possibilidades e restrições características da ferramenta podem conquistar ou afugentar potenciais usuários.

O estudo do estado da arte das ferramentas, das principais funcionalidades e características e, principalmente, das vantagens e desvantagens de cada método foram essenciais para o delineamento da ferramenta MASE. O desafio foi criar uma solução que atendesse às necessidades do problema e apresentasse inovações em relação à pesquisa na área. O resultado esperado do trabalho foi a proposição, implementação e validação da ferramenta computacional de simulação.

É importante ressaltar que, com base nos estudos efetuados, não existe hoje ferramenta de abordagem SMA que apresente flexibilidade de representação espaço-temporal capaz de simular diferentes modelos de forma genérica. A especificidade é inerente à metodologia SMA e um certo nível de detalhe é imprescindível para a descrição do modelo, mas são poucas as ferramentas que permitem a simulação de diferentes áreas de estudo, em diferentes escalas, com parâmetros configuráveis pelo usuário. Para a classe de problemas de cobertura e uso da terra, a MASE é uma dessas ferramentas. Ferramentas baseadas em outras técnicas que apresentam essa generalidade possuem várias restrições quanto à representação espacial. Muitas delas consideram o espaço homogêneo. Embora a ferramenta MASE trabalhe com um *grid* de simulação, que é inevitavelmente um modo de padronizar o espaço, a existência dos agentes espaciais confere infinitas possibilidades de caracterização das células. Além de permitir a variação da complexidade espacial (resolução e extensão), permite a distinção de dois pontos no espaço pela sua localização e por qualquer outro atributo modelado pelo usuário.

Em relação à dinamicidade, é comum que as ferramentas apresentem vizinhanças estacionárias. Com a parametrização da vizinhança do tipo *raio*, o usuário tem o poder de definir o campo de visão do agente e qual é extensão da influência das adjacências para as suas decisões. Em relação à decisão, a característica mais usual encontrada nas ferramentas que lidam com a decisão humana é representá-las como regras de transição universais. A ferramenta MASE explora essa lacunas ao combinar a flexibilidade dos agentes transformadores com o cálculo do mapa de utilidade e das variáveis políticas e proximais, determinando comportamentos distintos.

A proposição de uma metodologia híbrida, que buscasse incorporar nos mecanismos da ferramenta a avaliação *top-down* e *bottom-up* é outro diferencial do protótipo, em relação às ferramentas disponíveis e os trabalhos descritos na literatura. A hierarquia *bottom-up* é o padrão básico da ferramenta MASE. Entretanto é possível, de modo transparente ao usuário, considerar variáveis que influenciarão o modelo de maneira *top-down*, sendo mais um recurso disponível no rol de funcionalidades da ferramenta.

De modo geral, o resultado do trabalho de pesquisa ora apresentado tem como principais contribuições a definição de um modelo, o detalhamento arquitetural da ferramenta com a respectiva implementação do protótipo e, finalmente, a realização de experimentos de simulação de uso da terra com dados do Bioma Cerrado. Os resultados preliminares

mostraram que o sistema implementado é robusto o suficiente para coordenar e simular a interação de mais de 190 mil agentes por simulação, com resultados de acerto de cerca de 85% para alguns experimentos, resultado surpreendente para uma rodada inicial de simulações, ainda sem a ação mais evidente de calibração dos parâmetros por parte do usuário.

Foram também resultados da pesquisa a publicação parcial da proposta do projeto em conferências e revistas nacionais. A participação no VII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI), da Sociedade Brasileira de Computação (SBC), em Salvador/BA em maio de 2011, na sessão técnica de agentes inteligentes, permitiu uma boa troca inicial de experiências e ajustes no início do projeto. O artigo apresentado¹ foi eleito um dos dois melhores artigos apresentados no evento e selecionado para publicação na revista *Isys - Revista Brasileira de Sistemas de Informação*², também em 2011.

Conforme apresentado ao longo da dissertação, o tema da pesquisa é essencialmente multidisciplinar, integrando a Ciência da Computação com as Ciências Ecológicas, por meio de uma abordagem promissora de aplicação de agentes racionais, os quais podem utilizar a flexibilidade de representação conferida pelos SMA para simular problemas complexos e dinâmicos, inerentes as características do meio ambiente real.

7.1 Trabalhos Futuros

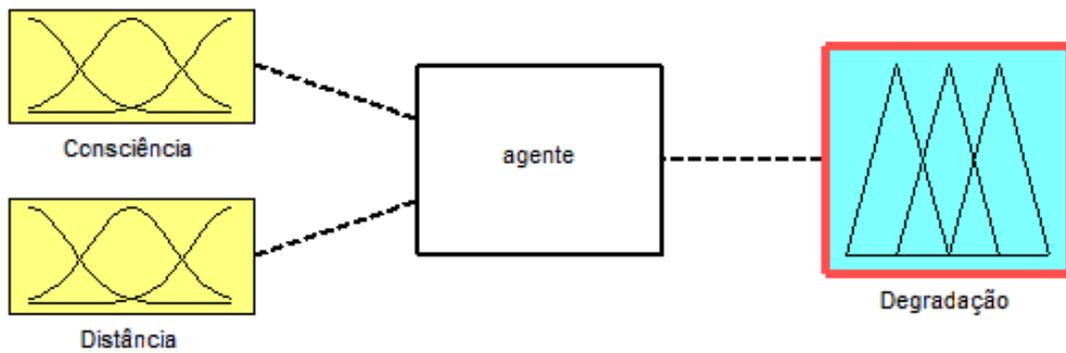
Pelo caráter multidisciplinar da pesquisa, são inúmeras as frentes de pesquisa que podem decorrer desse projeto inicial. Muitas melhorias podem ser feitas de modo a complementar as funcionalidades aqui apresentadas, principalmente considerando o refinamento dos mecanismos de raciocínio e interação dos agentes nos aspectos de ambiente, bem como na calibração e validação do modelo definido. Consideramos que os trabalhos futuros possam envolver os seguintes aspectos:

- Desempenho - explorar a implementação da ferramenta de maneira distribuída, de modo a buscar melhor desempenho e tempo de resposta nas simulações efetuadas. Essa frente de pesquisa permitirá gerar simulações mais robustas e escaláveis, permitindo a simulação de modelos virtualmente em qualquer extensão.
- Tratamento de imagem - refinar os processos de manipulação e visualização de imagens (mapas, variáveis), bem como da renderização da simulação. A independência de *softwares* como o Matlab pode ampliar a clientela da ferramenta e melhorar o desempenho de modo geral.
- Racionalidade dos agentes - acrescentar comportamentos pró-ativos, com novas possibilidades de interação entre os agentes, e entre o ambiente físico, sendo possível explorar padrões de comportamento para a exploração de cenários (*business as usual*, conservativo e degradativo). A utilização de regras de inferência, com a utilização, por exemplo, do motor de inferência Drools³ também são uma alternativa para aumentar a complexidade das regras implementadas e do comportamento dos agentes.

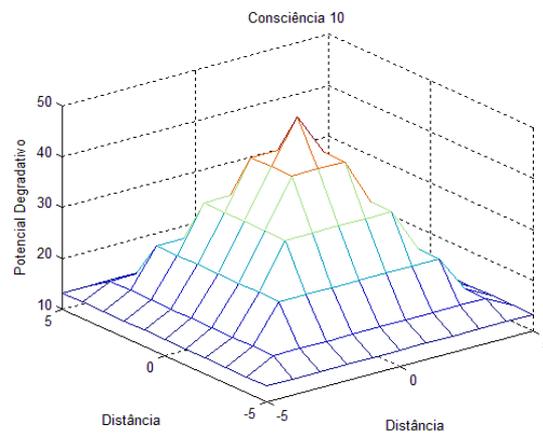
¹ABREU, C. G. ; RALHA, C. G. ; COELHO, C. G. C. ; ZAGHETTO, A. ; MACCHIAVELLO, B. L. . Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente Híbrida para Gestão Ambiental. In: VII Simpósio Brasileiro de sistemas de Informação, 2011, Salvador. Anais do VII SBSI, 2011.

²<http://www.seer.unirio.br/index.php/isys>

³<http://www.jboss.org/drools/>



(a) Visão geral das variáveis envolvidas na inferência



(b) Visão da dependência entre as variáveis conforme as regras definidas

Figura 7.1: Módulo de Lógica Fuzzy a ser implementado em trabalhos futuros.

Uma outra abordagem para a racionalidade dos agente genérico seria a implãntação de um módulo de lógica *fuzzy* para compor o mecanismo de decisão. Um protótipo dessa ideia foi implementado no Matlab, mas não integrado à ferramenta MASE. O objetivo é utilizar essa técnica para definir como um conjunto de variáveis influencia um determinado padrão de comportamento. Na Figura 7.1 tem-se o exemplo de um agente transformador que tem seu comportamento [Degradação] influenciado pelas variáveis [Consciência] e [Distância]. O módulo permite a definição de regras de produção, que devem capturar a essência do problema, aplicando um significado matemático à cada variável e, assim, configurando um sistema de inferência *fuzzy*. A meta futura é aperfeiçoar a técnica e refinar as regras para permitir a integração com a ferramenta já implementada. A parametrização do comportamento dos agentes também permitirá que esses adequem-se a cada novo cenário de maneira autônoma.

- Complexidade do Ambiente - aumentar a complexidade do ambiente SMA é desafio que pode ser explorado em trabalhos futuros. Para melhor representar o ambiente real seria possível estudar e implementar características mais complexas de ambiente, como representá-lo de maneira sequencial, contínua e dinâmica.
- Interface - é essencial, para a utilização e sobrevivência da ferramenta, a existência de uma interface clara e amigável para o usuário não-programador. Um projeto de usabilidade e acessibilidade deve ser desenvolvido para consolidar a interface da ferramenta MASE. Alguns esboços já foram projetados, ainda carecendo de análises e revisões para efetivar a implantação.
- Integração com ferramentas SIG - em estudos futuros, a arquitetura proposta pode se beneficiar da inclusão de módulo de integração de ferramentas de processamento de imagem, ou ferramentas SIG, para suprimir a necessidade de uso de outros *softwares*, simplificando o trabalho do usuário. Essa é uma frente de trabalho complexa, entretanto algumas possibilidades já foram aventadas como a integração com o *software* público *Terra View*.
- Documentação - definir a documentação básica da ferramenta, perpassando a documentação das classes de *software* e culminando no desenvolvimento de *white papers* e tutoriais.
- Detalhamento do modelo - agregar mais dados socioeconômicos, políticos e físicos como substrato para a ação dos agentes, enriquecendo as simulações. A modularização e o aperfeiçoamento das configurações pelos usuários pode fornecer subsídios para tornar a ferramenta mais flexível, como pela inserção de um módulo de definição de máquina de estados, por exemplo. O detalhamento do modelo, mapeando relações cada vez mais complexas entre os agentes, também pode contribuir para resultados cada vez mais relevantes para as ciências ambientais.
- Modelagem Participativa - da revisão teórica surge o interesse pela modelagem participativa, um tópico extremamente relevante nas discussões mais recentes acerca da pesquisa sobre o tema. A realização de um processo de modelagem participativa, com o auxílio da ferramenta MASE seria de valor inestimável para o avanço das pesquisas. Esse é um tópico extremamente multidisciplinar, podendo ser envolvi-

dos pesquisadores de inúmeras áreas. Há a manifestação de interesse da ferramenta em um processo de modelagem participativa envolvendo analistas do Ibama em um contexto de análise de impacto ambiental de um projeto de usina hidrelétrica, em estudo para licenciamento.

- Investigação por Setor Censitário - um estudo preliminar de distribuição por setor censitário das informações derivadas do Censo (população, número de empreendimentos agropecuários, área por cultura e pecuária), embora já iniciada, ainda carece de esforço de pesquisa para sua implementação. Com base nessas informações seria possível alocar os agentes transformadores conforme sua distribuição mapeada pelo Censo Agropecuário, por exemplo. A dedicação nessa frente de trabalho promoveria uma maior clareza e solidez nos processos de parametrização do modelo e ferramenta.
- Calibração - como citado na discussão dos resultados, é necessário efetuar uma bateria de testes para conhecer-se a relação exata entre os itens de configuração até que se tenha conhecimento da combinação em que a ferramenta fornece os melhores resultados possíveis ao usuário.

Referências

- Tinku Acharya and Ajoy K. Ray. *Image Processing: Principles and Applications*. Wiley-Interscience, 1st edition, 2005. 32, 34, 162, 163, 164, 165
- Chetan Agarwal, Glen M Green, J Morgan Grove, Tom P Evans, and Charles M Schweik. *A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice*. United States Department of Agriculture - USDA, 2001. 55, 56, 57, 113
- Claudia Maria De Almeida, Michael Batty, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Câmara, Britaldo Silveira Soares-Filho, Gustavo Coutinho Cerqueira, and Cássio Lopes Pennachin. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(5): 481–509, September 2003. 58, 80
- Sandro Jerônimo De Almeida, Ricardo Poley, Martins Ferreira, Álvaro E Eiras, Robin P Obermayr, and Martin Geier. Multi-agent modeling and simulation of an *Aedes aegypti* mosquito population. *Environmental Modelling and Software*, 25(12):1490–1507, 2010. 20
- Marc Antrop. The preoccupation of landscape research with land use and land cover. In Jianguo Wu and Richard Hobbs, editors, *Key Topics in Landscape Ecology*, page 316. Cambridge University Press, 2007. 7
- P. Arbeletche, J. Corral, J. C. Burges, H. Morales, G. Continanza, J. Couderc, V. Courdin, and P. Bommel. Dynamiques d’utilisation des terres de la pampa. Webpage, 2008. URL <http://cormas.cirad.fr/fr/applica/dinParcel.htm>. 62
- S Asmussen and P W Glynn. *Stochastic Simulation: Algorithms and Analysis*, volume 57 of *Stochastic Modelling and Applied Probability*. Springer, 2007. 16
- Thomas Eugene Avery and Graydon Lennis L. Berlin. *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. Prentice Hall, 5th edition, 1992. 32
- C Barnaud, F Bousquet, and G Trebil. Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand. *Ecological Economics*, 66(4):615–627, July 2008. 19
- O. Barreteau, C. Le Page, and P. Perez. Contribution of simulation and gaming to natural resource management issues: An introduction. *Simulation & Gaming*, 38(2):185–194, June 2007. 3, 54

- N Becu, P Perez, A Walker, O Barreteau, and C Le Page. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand Description of the CATCHS-CAPE model. *Ecological Modelling*, 170:319–331, 2003. [54](#), [59](#)
- Fabio Luigi Bellifemine, Giovanni Caire, and Dominic Greenwood. *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Wiley, 1st edition, 2007. [40](#), [42](#), [43](#), [44](#), [47](#), [50](#), [53](#), [108](#)
- Thomas Berger and Pepijn Schreinemachers. Creating Agents and Landscapes for Multi-agent Systems from Random Samples. *Ecology And Society*, 11(2):19, 2006. [66](#)
- Christoph Böhringer and Thomas F Rutherford. Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics*, 30(2):574–596, 2008. [18](#)
- Eric Bonabeau. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3:7280–7, May 2002. [17](#)
- Regis Bonelli and Rio De Janeiro. Impactos Econômicos e Sociais de Longo Prazo da Expansão Agropecuária no Brasil: Revolução Invisível e Inclusão Social. In *Textos para Discussão nº 838*, page 37. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2001. [31](#)
- J. L. Bonnefoy, C. Le Page, J. Rouchier, and F. Bousquet. Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agents. In G. Ballot and G. Weisbuch, editors, *Application of simulation to social science*, pages 155–168. Hermès, Paris, 2000. [62](#)
- Norman E. Borlaug. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 38(2):221–228, March 2002. [23](#)
- T R J Bossomaier and David G. Green. *Complex Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. [7](#)
- F Bousquet and C Le Page. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176:313–332, 2004. [3](#), [17](#), [36](#), [53](#)
- François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton, and Christophe Le Page. Cormas: Common-Pool Resources and Multi-agent Systems. pages 826–837. 1998. [59](#)
- R N Bracewell. The Fourier transform. *Scientific American*, 260(6):86–89, 92–95, 1989. [165](#), [166](#)
- BRASIL. Lei Nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, 1965. [1](#)
- R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence Report*, 47:139–159, 1991. [42](#)
- Gilberto Câmara, Ricardo Cartaxo Modesto Souza, Ubirajara Moura Freitas, and Juan Garrido. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20(3):395–403, 1996. [162](#)
- James B. Campbell. *Introduction to Remote Sensing: Second Edition*. Guilford Press; Second Edition edition, 1996. [32](#)

- P C Campo. Integrating Multi-Agent Systems and Geographic Information Systems Modeling with Remote-Sensing Data for Participatory Natural Resource Management in Coastal Bohol, Philippines. In F Bousquet, G Trebil, and B Hardy, editors, *Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia*, pages 255–274. International Rice Research Institute, 2005. 19
- J Castella, S Phengkam, D Dinhquang, P Verburg, and C Thaihoanh. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 24(3):531–545, 2007. 18, 19
- Kenneth R. Castleman. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2nd edition, 1995. 162, 163, 167
- Sergey Chernenko. Gaussian filter, or Gaussian blur, 2011. URL <http://www.librow.com/articles/article-9>. 168
- Guarino R. Colli, Rogério P. Bastos, and Alexandre F. B. Araújo. The Character and Dynamics of the Cerrado Herpetofauna. In Paulo S. Oliveira and Robert J. Marquis, editors, *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna*, pages 223–241. Columbia University Press, 1st edition, 2002. 25
- J W Cooley and J W Tukey. An algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, 19(90):297–301, 1965. 166
- Khanh H. Dam and Michael Winikoff. Comparing Agent-Oriented Methodologies. In *AOIS at AAMAS'03, Melbourne, Australia*, pages 78–93, 2003. 45, 46
- Patrick D'Aquino, Christophe Le Page, François Bousquet, and Alassane Bah. Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3), 2003. 59
- K. Decker and K. Sycara. Intelligent adaptive information agents. *Journal of Intelligent Information Systems*, 9(3):239–260, 1997. 53
- Paulo Diniz, Sergio Netto, and Eduardo Da Silva. *Digital Signal Processing: System Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2002. 162
- E Durfee. Distributed Problem Solving and Planning. In Gerhard Weiß, editor, *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, pages 121–164. MIT Press, 2000. 44
- J Ronald Eastman. IDRISI 32.2 guide to GIS and image processing. Technical report, Clark Labs, Clark University, Worcester, USA, 2001. 59
- Jacques Ferber. *Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Professional, Massachusetts, 1999. 37, 38

- I A Ferguson. Towards an architecture for adaptive, rational, mobile agents. In E Werner and Y Demazeau, editors, *Proceedings of the Third European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a MultiAgent World*, volume 890 of *Decentralized AI 3*, pages 249–262. Elsevier Science Publishers, 1991. 42
- Tarciso S Filgueiras. Herbaceous Plant Communities. In Paulo S. Oliveira and Robert J. Marquis, editors, *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savana*, pages 121–139. Columbia University Press, 2002. 25
- FIPA. Fipa abstract architecture specification, 2002. URL <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/>. 49
- FIPA. Fipa acl message structure specification, 2003. URL <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/>. 41, 48
- R. Fisher, S. Perkins, A. Walker, and E. Wolfart. Gaussian Smoothing, 2003. URL <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>. 169
- Richard T T Forman and Michel Godron. *Landscape ecology*. Wiley & Sons Ed, New York, 1986. 7
- Robert H Gardner and Steven Walters. Neutral Landscape Models. In Sarah E. Gergel and Monica G Turner, editors, *Learning Landscape Ecology*, chapter 9, pages 112–128. Springer-Verlag, 2002. 14, 16
- GDF. Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal: documento técnico. Technical report, Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano - SEDHAB, Brasília, 2009. 115
- Jerry D Gibson and Alan C Bovik. *Handbook of Image and Video Processing*. Elsevier Academic Press, 2005. 162
- Vincent Ginot, Christophe Le Page, and Sami Souissi. A multi-agents architecture to enhance end-user individual- based modelling. *Ecological Modelling*, 157:23–41, 2002. 53, 59
- Jonas Gomes and Luiz Velho. *Computação Gráfica: Imagem*. INPA/SBM, 1994, Rio de Janeiro, 1st edition, 1994. 166, 167
- Rafael C. Gonzales and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd edition, 2007. 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169
- William E Grant, Ellen K Pedersen, and Sandra L Marín. *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*. Wiley, 1997. 10
- David G. Green, Nicholas Klomp, Glyn Rimmington, and Suzanne Sadedin. *Complexity in Landscape Ecology: Landscape Series*. Springer, 1st edition, 2006. 3, 7, 13
- Volker Grimm, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, Tamara Grand, Simone K Heinz, and Geir Huse. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2):115–126, 2006. 5, 21, 22, 70

- Volker Grimm, Uta Berger, Donald L DeAngelis, J Gary Polhill, Jarl Giske, and Steven F Railsback. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23):2760–2768, 2010. 21
- Mandy Haggith, Sutherland Iv, Robert I Muetzelfeldt, and Jasper Taylor. Modelling Decision-making in Rural Communities at the Forest Margin. *Management*, 2(2):241–258, 2003. 70
- B. Henderson-Sellers and P. Giorgini. *Agent-Oriented Methodologies*. Idea Group Publishing, 2005. 45
- Elke Hietel, Rainer Waldhardt, and Annette Otte. Analysing land-cover changes in relation to environmental variables in Hesse, Germany. *Landscape Ecology*, 19(5):473–489, 2004. 8
- Victor Horling, Bryan; Lesser. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 19(4):281, 2005. 44
- Thomas Houet, Peter H Verburg, and Thomas R Loveland. Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 25:163–167, 2010. 2, 8, 14
- Michael Huston, Donald DeAngelis, and Wilfred Post. New computer models unify ecological theory. *BioScience*, 38(10):682–691, 1988. 17
- Ibama. Monitoramento do bioma Cerrado 2002 a 2008. Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA. Technical report, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2009. URL <http://www.mma.gov.br/portalbio>. 26, 29, 111
- IBGE. *Introdução ao Processamento Digital de Imagens: Manuais técnicos em Geociências - número 9*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro - RJ, 2001. 31, 32, 34
- IBGE. *Manual Técnico de Uso da Terra: Manuais Técnicos em Geociências - número 7*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro - RJ, 2nd edition, 2006. 8
- N. Jennings and M. Wooldridge. Applications of intelligent agents. In NJ Secaucus, editor, *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*, pages 3–28. Springer-Verlag, 1998. 53
- J. R. Jensen. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da Segunda Edição*. Parêntese, São José dos Campos - SP, 2009. 32
- R H G Jongman, C J F Ter Braak, and O F R Van Tongeren. *Data analysis in community and landscape ecology*, volume 2. Cambridge University Press, 1995. 7
- Carlos A Klink and Ricardo B Machado. A conservação do Cerrado brasileiro. volume 1, pages 147–155. 2005. 2, 25, 28, 31

- Carlos A. Klink and Adriana G. Moreira. Past and Current Human Occupation, and Land Use. In Robert J. Marquis and Paulo S. Oliveira, editors, *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savana*, chapter 5, pages 69–88. Columbia University Press, 1st edition, 2002. [25](#), [28](#), [31](#)
- E F Lambin, M D A Rounsevell, and H J Geist. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity ? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 82: 321–331, 2000. [8](#), [9](#), [21](#)
- Averill M Law and David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw Hill, 3rd edition, 2000. [11](#)
- Quang Bao Le, Soo Jin Park, Paul L.G. Vlek, and Franco Zambonelli. Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled humanlandscape system. I. Structure and theoretical specification. *Ecological Informatics*, 3(2):135–153, April 2008. [70](#)
- Quang Bao Le, Soo Jin Park, and Paul L.G. Vlek. Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled humanlandscape system2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies. *Ecological Informatics*, 5(3):203–221, May 2010. [70](#), [80](#)
- John Thangarajah Lin Padgham and Michael Winikoff. Prometheus design tool. In D. Fox and C Gomes, editors, *Proceedings of the 23rd AAI Conference on Artificial Intelligence 2008*, pages 1882–1883. AAAI Press, 2008. [5](#), [47](#)
- Helmut Lorek and Michael Sonnenschein. Modelling and simulation software to support individual-based ecological modelling. *Ecological Modelling*, 115(2-3):199–216, February 1999. [70](#)
- George F Luger. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*. Addison-Wesley, 5th edition, 2005. [36](#)
- Eduardo Eiji Maeda, Barnaby J.F. Clark, Petri Pellikka, and Mika Siljander. Modelling agricultural expansion in kenya’s eastern arc mountains biodiversity hotspot. *Agricultural Systems*, 103(9):609–620, 2010. [63](#)
- Anu Maria. Introduction to modeling and simulation. In *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation - WSC '97*, pages 7–13, New York, New York, USA, 1997. ACM Press. [9](#), [11](#), [12](#)
- Carlos Eduardo Marinelli, Cassio Giorgio Couto Coelho, Celia Ghedini Ralha, Alexandre Zaghetto, and Bruno Macchiavello. Modelo de simulação com uso de abordagem de sma para o zoneamento de unidades de conservação da amazônia. In *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*. 2010. [63](#)
- J Marinho-Filho, F. H. Rodrigues, and K. M. Juarez. The Cerrado Mammals: diversity, ecology, and natural history. In P. S. Oliveira and Robert J. Marquis, editors, *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savana*, pages 266–284. Columbia University Press, 2002. [25](#)

- Ogê Marques Filho and Hugo Vieira Neto. *Processamento Digital de Imagens*. Brasport, Rio de Janeiro, 1999. [162](#), [164](#), [167](#)
- Robin B Matthews, Nigel G Gilbert, Alan Roach, J Gary Polhill, and Nick M Gotts. Agent-based land-use models : a review of applications. *Landscape Ecology*, pages 1447–1459, 2007. [3](#), [14](#), [17](#), [61](#)
- James Mayfield, Yannis Labrou, and Tim Finin. Evaluation of KQML as an Agent Communication Language. In Michael Wooldridge, Jörg P Müller, and Milind Tambe, editors, *Intelligent Agents Volume II*, volume 1037 of *LNAI*, pages 347–360. Springer-Verlag, 1996. [40](#)
- C. A. McAlpine, A. Etter, P.M. Fearnside, L. Seabrook, and W.F. Laurance. Increasing world consumption of beef as a driver of regional and global change: A call for policy action based on evidence from Queensland (Australia), Colombia and Brazil. *Global Environmental Change*, 19(1):21–33, February 2009. [8](#), [28](#)
- Brian S. McIntosh, Georgii Alexandrov, Keith Matthews, Jaroslav Mysiak, and Martin van Ittersum. Preface: Thematic issue on the assessment and evaluation of environmental models and software. *Environmental Modelling & Software*, 26(3):245–246, March 2011. [20](#)
- B.S. McIntosh, R.a.F. Seaton, and P. Jeffrey. Tools to think with? Towards understanding the use of computer-based support tools in policy relevant research. *Environmental Modelling & Software*, 22(5):640–648, May 2007. [61](#)
- R. C. Mendonça. Flora vascular do Bioma Cerrado: Checklist com 12.356 espécies. In Sueli Matiko Sano, Semíramis Pedrosa De Almeida, and José Felipe Ribeiro, editors, *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa Informação Tecnológica, 2008. [25](#)
- W. A. Menner. Introduction to Modeling and Simulation. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 16(1):6–17, 1995. [11](#)
- Jean Paul Metzger, Marina Antongiovanni, D A Fonseca, Francisco José, Barbosa D E Oliveira, and Alexandre Camargo Martensen. O uso de modelos em ecologia de paisagens. *Megadiversidade*, 3(1-2):64–73, 2007. [9](#), [14](#)
- MMA. *Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção*. Ministério do Meio Ambiente e Fundação Biodiversitas, 1st edition, 2008. [31](#)
- J.P Muller, M Pischel, and M. Thiel. Modelling Reactive Behaviour in Vertically Layered Agent Architectures. In M. Wooldridge and N.R. Jennings, editors, *Intelligent Agents: Theories, Architectures, and Languages*, volume 890 of *LNAI*, pages 261–276. Springer-Verlag, 1995. [42](#)
- N Myers, R a Mittermeier, C G Mittermeier, G a da Fonseca, and J Kent. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772):853–858, 2000. [25](#)
- W. Naivinit, C. Le Page, G. Trébuil, and N. Gajaseni. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand. *Environmental Modelling & Software*, 25(11):1345–1358, November 2010. [19](#)

- Z Naveh and A Lieberman. *Landscape ecology: theory and application*. Springer-Verlag, New York, 1994. 7
- Francis Neelamkavil. *Computer Simulation and Modelling*. Wiley, 1st edition, 1987. 10
- A. G. Novaes. *Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes*. Edgard Blücher Ed., São Paulo, 1982. 9
- Lin Padgham and Michael Winikoff. *Prometheus: A Practical Agent-Oriented Methodology*. Idea Group Publishing, 2005. 45, 46, 47
- Christophe Le Page, François Bousquet, and Innocent Bakam. CORMAS: A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales. In *The Ecology of Scales*, pages 1–20, Wageningen, The Netherlands, 2000. 59
- H Pedrini and W R Schwartz. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. Thomson Learning, 1st edition, 2007. 164
- William K. Pratt. *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*. Wiley-Interscience, 4th edition, 2007. 164, 166
- José Felipe Ribeiro and B. M. T. Walter. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In Sueli Matiko Sano and Semíramis Pedrosa De Almeida, editors, *Cerrado: ambiente e flora*, pages 87–166. Embrapa-CPAC, 1998. 24
- Ronald R Rindfuss, Stephen J Walsh, B L Turner, Jefferson Fox, and Vinod Mishra. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39):13976–13981, 2004. 8
- Derek T Robinson, Daniel G Brown, Dawn C Parker, Pepijn Schreinemachers, Marco A Janssen, Marco Huigen, Heidi Wittmer, Nick Gotts, Panomsak Promburom, Elena Irwin, Thomas Berger, Franz Gatzweiler, and Cécile Barnaud. Comparison of empirical methods for building agent-based models in land use science. *Journal of Land Use Science*, 2(1):31–55, 2007. 66
- Júlio César Roma. *A fragmentação e seus efeitos sobre as aves de fitofisionomias abertas no Cerrado*. PhD thesis, Universidade de Brasília, 2006. 25
- J C Russ. *The Image Processing Handbook*, volume 29. CRC Press, 2006. 166, 167
- Stuart J Russel and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: a modern approach*. Prentice Hall, 2nd edition, 2010. 36, 37, 40, 68, 92, 93
- Edson Eyji Sano, Roberto Rosa, Jorge Luís Silva Brito, and Laerte Guimarães Ferreira. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. volume 43, pages 153–156. January 2008. 2, 23, 26, 28, 29, 30, 113
- Edson Eyji Sano, Roberto Rosa, Jorge Luís Silva Brito, and Laerte Guimarães Ferreira. *Mapeamento do Uso do Solo e Cobertura Vegetal: Bioma Cerrado Ano-Base 2002*. Brasília, 2010. 24, 35

- Milton Santos and Maria Laura. S Silveira. *O Brasil: território e sociedade no início do século XXI*. Record, Rio de Janeiro, 6 edition, 2004. 1
- Mehdi Saqalli, Charles L. Biielders, Bruno Gerard, and Pierre Defourny. Simulating rural environmentally and socio-economically constrained multi- activity and multi-decision societies in a low-data context: A challenge through empirical agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(2), 2010. 62
- John R. Searle. *Speech acts: an essay in the philosophy of language*. Cambridge University Press, London, 1969. 41
- Linda G. Shapiro and George C. Stockman. *Computer Vision*. Prentice Hall, 1st edition, 2001. 167
- J. A. X. da. A Silva. A pesquisa ambiental no Brasil: uma visão crítica. In *Cadernos de Geociências*, chapter nº 14, pages 15–27. IBGE, Rio de Janeiro, 1995a. 1
- J. M. C. Silva. Birds of the Cerrado Region, South America. *Steenstrupia*, 21:69–92, 1995b. 25
- Alex Smajgl, Daniel G Brown, Diego Valbuena, and Marco G A Huigen. Environmental Modelling & Software Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling and Software*, 26(7):837–844, 2011. 5, 20, 66, 67, 68, 69
- Joyotee Smith, Manuel Winograd, Gilberto Gallopin, and Douglas Pachico. Dynamics of the agricultural frontier in the Amazon and savannas of Brazil : analyzing the impact of policy and technology. *Environmental Modeling and Assesment*, 3:31–46, 1998. 2, 28, 29, 70, 78, 79, 113
- Reid G Smith. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, C-29(12):1104–1113, 1980. 43
- Britaldo Silveira Soares-Filho, Gustavo Coutinho Cerqueira, and Cássio Lopes Pennachin. DINAMICA a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3):217–235, September 2002. 5, 16, 58
- Britaldo Silveira Soares-Filho, L Corradi, Gustavo Coutinho Cerqueira, and W Araújo. Simulating the Spatial Patterns of Change through the use of the Dinamica Model. In *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte, Brasil, 2003. INPE. 58
- Britaldo Silveira Soares-Filho, Gustavo Coutinho Cerqueira, W. L. Araujo, and E Voll. Modelagem de Dinâmica de Paisagem : Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação baseados em Autômato Celular. In A. L. Albernaz, J. M. C. da Silva, and D. Valeriano, editors, *Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais*, pages 1–16. Editora Museu Paraense Emílio Goeldi (no prelo), 2004. 80

- B Sterk, M K Van Ittersum, and C Leeuwis. Environmental Modelling & Software How , when , and for what reasons does land use modelling contribute to societal problem solving ? *Environmental Modelling and Software*, 26(3):310–316, 2011. [20](#)
- Katia P Sycara. Multiagent systems. *AI Magazine*, 19(2):79–92, 1998. [37](#), [38](#)
- Hamdy A Taha. *Operational Research: An Introduction*. Prentice Hall, 2006. [9](#), [10](#)
- Monica G Turner, Robert H Gardner, and Robert V O Neill. Ecological Dynamics at Broad Scales: Ecosystems and landscapes. *BioScience*, 45:29–35, 1995. [7](#)
- Monica G Turner, Robert H Gardner, and Robert V O’Neill. *Landscape Ecology in theory and practice: pattern and process*. Springer-Verlag New York, Inc., 2001. [7](#), [9](#), [35](#)
- B L Turner II, W B Meyer, and D L Skole. Global land use/land cover change: towards an integrated study. *Ambio*, 23(1):91–95, 1994. [8](#)
- M. B. Usher. Modelling ecological succession, with particular reference to Markovian models. *Plant Ecology*, 46-47(1):11–18, November 1981. [15](#)
- A Veldkamp. CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecological Modelling*, 85:253–170, 1996. [60](#)
- A. Veldkamp and L. O. Fresco. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling*, 91:231–248, 1996. [5](#), [60](#)
- Luiz Velho, Alejandro Frery, and Jonas Gomes. *Image Processing for Computer Graphics and Vision*. Texts in Computer Science. Springer London, London, 2nd edition, 2009. [162](#)
- P Verburg. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling*, 116(1):45–61, March 1999. [19](#)
- Peter H Verburg. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. volume 21, pages 1171–1183. 2006. [3](#), [13](#), [18](#), [19](#)
- Peter H Verburg, Welmoed Soepboer, A Veldkamp, Ramil Limpiada, Victoria Espaldon, and Sharifah S A Mastura. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. volume 30, pages 391–405. 2002. [60](#)
- Peter H Verburg, Paul P Schot, Martin J Dijst, and A Veldkamp. Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4):309–324, December 2004. [2](#), [54](#), [61](#)
- Peter H Verburg, Jeannette Van De Steeg, A Veldkamp, and Louise Willemen. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90(3):1327–1335, 2009. [19](#)
- Peter H Verburg, Kathleen Neumann, and Linda Nol. Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17(2):974–989, 2011. [21](#)

- Gerhard Weiss. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 2000. [3](#), [36](#), [38](#)
- D Weyns, A Omicini, and J Odell. Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, 14(1):5–30, 2006. [39](#)
- Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55(3):601–644, July 1983. [5](#), [16](#)
- Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, LTD, Chichester, England, 2nd edition, 2009. [3](#), [36](#), [37](#), [38](#), [39](#), [42](#), [43](#), [44](#), [45](#), [50](#)
- Jianguo Wu and Richard Hobbs. Key issues and research priorities in landscape ecology : An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology*, 17:355–365, 2002. [8](#)
- Jianguo Wu and Richard J Hobbs. *Key topics in landscape ecology*. Cambridge University Press, 1st edition, 2007. [13](#), [18](#)

Apêndice A

Processamento Digital de Imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma disciplina associada ao Processamento Digital de Sinais (PDS) (Diniz et al., 2002), área tradicional da Engenharia Elétrica, que tem por unidade de trabalho a imagem. O campo de PDI refere-se ao processamento de imagens digitais por meio de um computador digital (Gibson e Bovik, 2005; Gonzales e Woods, 2007; Marques Filho e Vieira Neto, 1999). Velho et al. (2009) acrescentam que no PDI, o sistema admite como entrada uma imagem que, após processamento, resulta em uma saída que deve ser também uma imagem. Segundo Câmara et al. (1996), a utilização das técnicas do processamento digital de imagens objetivam melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais, para o analista humano ou para outro propósito específico, bem como fornecer subsídios para a interpretação, inclusive com a geração de subprodutos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

O PDI é área de pesquisa relativamente recente, frente ao secular estudo dos estímulos visuais. É fundamentalmente um campo interdisciplinar, com interfaces com a óptica, a eletrônica, a matemática, a fotografia e a Ciência da Computação. Atualmente, o PDI é aplicado em todos os tipos de imagem. O crescimento contínuo dessa área de conhecimento deve-se, entre outros fatores, à redução dos custos dos componentes computacionais e à maior disponibilidade de equipamentos para a digitalização e visualização de imagens (Castleman, 1995). Gonzales e Woods (2007) afirmam que hoje, quase não existem áreas de esforço técnico que não são impactadas de algum modo pelo processamento digital de imagens. São inúmeras as áreas de aplicação, desde sistemas automáticos de inspeção visual, à interpretação de cenas obtidas pelo sensoriamento remoto ou à interpretação de imagens biomédicas (Acharya e Ray, 2005).

O interesse nos métodos de PDI deriva de duas áreas de aplicação principais: a melhoria da informação pictorial para interpretação humana, e o processamento de dados de imagem para o armazenamento, transmissão e representação para a percepção de máquina autônoma. Um paradigma útil para diferenciar as variadas aplicações do PDI é considerar três tipos de processos computadorizados: os de baixo, médio e alto nível. Um processo de baixo nível é caracterizado pelo fato de que ambas, a entrada e a saída, são imagens. Um processo de médio nível envolve tarefas como a segmentação, ou seja, as entradas são geralmente imagens, mas as saídas são atributos extraídos dessas imagens. Finalmente, processamento em alto nível envolve dar sentido a um conjunto de objetos reconhecidos, como na análise de imagens, e executar as funções cognitivas, normalmente associadas à visão (Gonzales e Woods, 2007).

A.1 Fundamentos da Imagem

Uma cena pode ser definida como uma entidade tridimensional formada a partir da reflexão de energia radiante. Um fluxo de radiação de uma fonte, ao se propagar pelo espaço, pode interagir com a superfície dos objetos de uma cena. A energia absorvida pelos objetos geralmente provoca aquecimento. Já a energia refletida carrega informações a respeito desses objetos. As propriedades observadas no fluxo de energia refletido dependem diretamente das propriedades físico-químicas dos elementos com os quais o fluxo de energia emitido pela fonte interagiu. Sensores que sejam sensíveis à faixa de radiação refletida podem registrar tais propriedades (Castleman, 1995). A principal fonte de energia é o espectro eletromagnético. Nesse espectro, é possível categorizar os campos de aplicação conforme o tipo de radiação do espectro, como aplicações na faixa do visível, imagens de Raio X, imagens geradas a partir de raios gama, imagens da banda ultravioleta, das bandas de infra-vermelho, microondas, rádio, entre outros (Gonzales e Woods, 2007). Sistemas construídos com a finalidade de se capturar uma cena real e registrá-la em uma imagem são chamados sistemas de imageamento.

Dessa maneira, apesar da cena ser uma entidade tridimensional, uma imagem monocromática pode ser representada por uma função bidimensional, como apresentado na Equação A.1.

$$f = (x, y) \tag{A.1}$$

onde x e y são coordenadas espaciais, e a amplitude f de qualquer par de coordenadas (x,y) é chamada de intensidade da imagem (ou nível de cinza) para aquele ponto. Quando x,y e a intensidade dos valores de f são todos finitos, denomina-se a imagem como uma imagem digital (Gonzales e Woods, 2007).

Já uma imagem colorida pode ser representada como uma função descrita pela Equação A.2.

$$C = (x, y, t, \lambda) \tag{A.2}$$

sendo, portanto, uma função da localização (x,y) , do comprimento λ da luz refletida, e também do tempo t , no caso de uma imagem dinâmica. A existência de três funções de sensibilidade espectral $V_R(\lambda)$, $V_G(\lambda)$, e $V_B(\lambda)$ fornece a base para a visão em cores (R-*red*, G-*green*, e B-*blue*) (Acharya e Ray, 2005). A luz (informação cromática) refletida de um objeto é absorvida pelas células especializadas (cones) do sistema visual. A interpretação da absorção de luz nos cones, pelo sistema nervoso humano, é a base da percepção de cor. O olho humano é sensível à radiação eletromagnética nos comprimentos de onda que variam entre 400 *nm* (violeta) aos 770 *nm* (vermelho).

Conforme Gonzales e Woods (2007), uma imagem pode ser contínua com respeito às coordenadas espaciais x e y , e com respeito à intensidade $f(x, y)$. O processo de digitalização nada mais é que a discretização dessas variáveis. A imagem digital é composta de um número finito de elementos, cada qual com sua localização e valores particulares. Esses elementos são referenciados como elementos da figura. *Pixel* é o termo mais amplamente usado para denotar os elementos de uma imagem digital. A Figura A.1 ilustra uma imagem composta por 5 linhas, 5 colunas e 256 níveis de cinza.

14	98	8	20	141
14	110	96	110	173
148	67	29	67	166
164	53	21	117	175
74	41	17	15	74

Figura A.1: Exemplo de imagem digital.

A.2 Realce de Imagem

Existem uma infinidade de imagens que são utilizadas para propósitos diversos. Quando imagens são transformadas por processos, a qualidade de saída pode ser inferior à imagem inicial. Em outro caso, quando é necessário ressaltar alguma característica de interesse na imagem, a melhoria da imagem também é desejada. Em ambos os casos, há a necessidade de melhorar a qualidade das imagens, para que a imagem resultante seja mais útil para o observador, segundo os seus critérios. O melhoramento de imagens também busca desfazer efeitos de degradação que podem ter sido causados por algum sistema ou canal (Acharya e Ray, 2005).

O principal objetivo das técnicas de realce de imagens é processar uma imagem de modo que a imagem resultante seja mais adequada que a imagem original para uma aplicação específica. Desse modo, a interpretação de resultado mais adequado normalmente é subjetiva e depende do conhecimento prévio do observador a respeito das imagens analisadas (Marques Filho e Vieira Neto, 1999).

Para Acharya e Ray (2005), muitas técnicas de melhoramento são empíricas e necessitam de procedimentos interativos para a obtenção de resultados satisfatórios. O uso de técnicas de processamento digital para melhoramento da imagem tem recebido muito interesse com a publicidade advinda de aplicações em imagens espaciais e de pesquisa médica. Outras aplicações incluem o realce da imagem para levantamentos fotográficos e análise radiográfica industrial (Pratt, 2007).

O melhoramento de imagens divide-se em duas amplas categorias: métodos do domínio espacial e métodos do domínio da frequência. O termo domínio espacial se refere ao plano da imagem em si, e as abordagens dessa categoria são baseadas na manipulação direta dos *pixels* dessa imagem. Técnicas do processamento no domínio da frequência baseiam-se na modificação da transformada de Fourier de uma imagem. Muitas técnicas conjugam combinação de métodos dessas duas abordagens (Gonzales e Woods, 2007).

Uma técnica de realce de qualidade das imagens é a filtragem. A filtragem tem por objetivos a melhoria da nitidez de uma imagem, a eliminação de ruídos, a pré-segmentação de imagens, a eliminação ou provocação de distorções, ou a criação de efeitos específicos para a aplicação (Pedrini e Schwartz, 2007). Em última instância, visa tornar a imagem mais apropriada para um fim específico. Serão explicitados, nas Seções A.2.1 e A.2.2 conceitos e exemplos de filtragem.

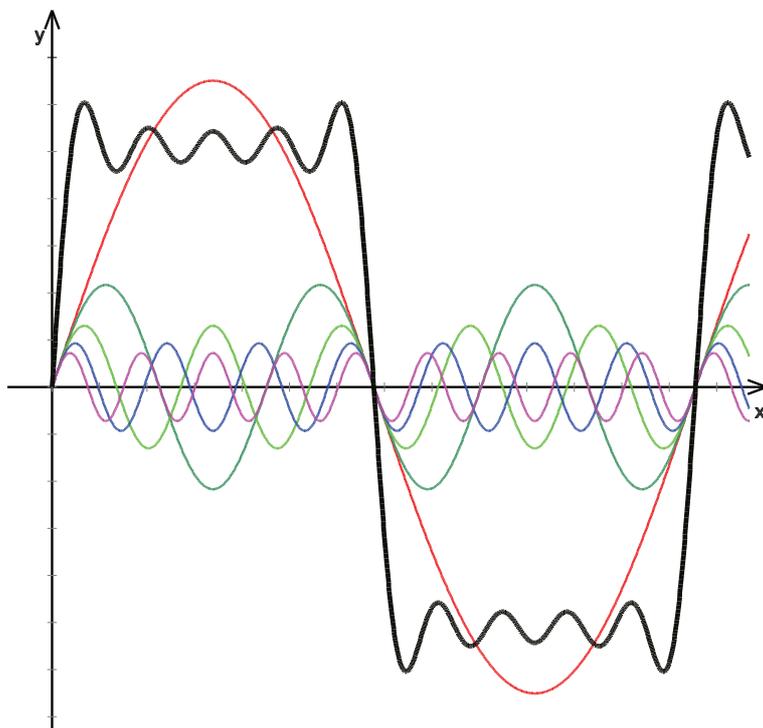


Figura A.2: Curva em preto decomposta em suas componentes senoidais.

A.2.1 Filtragem no Domínio da Frequência

As técnicas de filtragem no domínio da frequência são baseadas na transformada de Fourier. Fazem-se necessários esclarecimentos sobre como a transformada de Fourier e o domínio da frequência podem ser usados para o processamento de imagens. A contribuição do matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier afirma que qualquer função que se repete periodicamente pode ser expressada pela soma dos senos e/ou cossenos das diferentes frequências (Figura A.2, sendo que cada um é multiplicado por um coeficiente. Esta soma leva o nome de série de Fourier (Gonzales e Woods, 2007). Funções que não são periódicas, mas cuja área embaixo da curva é finita, podem ser expressadas como a integral dos senos e/ou cossenos, multiplicada por uma função ponderada. A formulação nesse caso é a Transformada de Fourier Bracewell (1989), e sua utilidade é ainda maior que a Série de Fourier na maioria dos problemas práticos.

Uma operação linear $T : S \rightarrow S'$ entre dois modelos funcionais distintos de um espaço de sinais é chamada de transformada. Transformadas de imagens bidimensionais são extremamente importantes nas áreas de estudo do processamento de imagens. A saída da imagem no espaço transformado pode ser analisada, interpretada e adicionalmente processada para a implementação de diversas tarefas do processamento de imagens. Essas transformações são amplamente utilizadas, uma vez que se um emprego permite expressar uma imagem como sendo a combinação de um conjunto de sinais básicos, conhecidos como as funções base (Acharya e Ray, 2005).

Em geral, exige-se que essa transformação seja invertível, de modo a possibilitar uma conversão completa entre os dois modelos funcionais de imagens, sem perda de informação. O uso de transformadas permite a mudança entre diversos modelos de sinais de modo a

se obter um modelo mais adequado à solução de determinado problema (Gomes e Velho, 1994).

Em última instância, Gonzales e Woods (2007) informam que foi a utilidade das séries e transformadas de Fourier na resolução de problemas práticos que as fez amplamente usadas e estudadas como ferramentas fundamentais. O advento da computação digital e a produção de um algoritmo eficiente para computar a transformada de Fourier, conhecido como FFT - *Fast Fourier Transform* (Bracewell, 1989; Cooley e Tukey, 1965), no final dos anos 50, revolucionou o campo de processamento de sinais.

A literatura é rica em descrições e discussões acerca da transformada de Fourier. A abordagem usual para o desenvolvimento da base matemática da transformada de Fourier começa com uma onda unidimensional e depois se expande para duas dimensões (uma imagem). Em princípio, isso também pode ser estendido para três dimensões ou mais. Para o estudo em questão, uma noção inicial é suficiente para apreender os conceitos necessários para a pesquisa. Alguns conceitos iniciais são apresentados a seguir. Para a completa descrição da base matemática, consultar (Gonzales e Woods, 2007; Pratt, 2007; Russ, 2006).

Conforme sintetizado por Russ (2006), define-se uma função $f(x)$, onde x é uma variável real que representa tanto o tempo quanto a distância em uma direção, por uma imagem. É comum referir-se a esta função como a função no domínio do tempo ou do espaço e da transformada de Fourier F como a função de frequência-espaço. A função f é uma função contínua. O teorema de Fourier, como citado anteriormente, afirma que é possível decompor qualquer função unidimensional $f(x)$ como um somatório de senos e cossenos. A transformada de Fourier da função $f(x)$ é representada por $F(u)$ e descreve a quantidade de cada termo de frequência que devem ser somados para compor $f(x)$. Pode ser descrita conforme Equação A.3.

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-2\pi iux} dx \quad (\text{A.3})$$

onde i é $\sqrt{-1}$. Para a conversão de seno e cosseno, utiliza-se a identidade matemática fornecida pela fórmula de Euler apresentada na Equação A.4.

$$e^{-2\pi iux} = \cos(2\pi ux) - i\sin(2\pi ux) \quad (\text{A.4})$$

Finalmente, dada $F(u)$ é possível recuperar a função $f(x)$ da mesma forma, conforme Equação A.5.

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u)e^{-2\pi iux} du \quad (\text{A.5})$$

A inversão da transformada de Fourier é um dos fundamentos de capital relevância para as técnicas de filtragem. Na filtragem no domínio da frequência, inicialmente a imagem é transformada do domínio espacial para o da frequência via transformada de Fourier. Então, as operações de filtragem são realizadas nessa imagem e finalmente, realiza-se o processo inverso, onde a imagem no domínio da frequência é transformada para o domínio espacial. As filtrações nesse domínio apresentam boas respostas, entretanto, as técnicas

de PDI mais adequadas às necessidades da proposta em estudo pertencem ao domínio espacial. Dessa maneira, restringem-se as informações contidas nessa seção aos conceitos elementares e sugere-se a leitura de (Castleman, 1995; Gonzales e Woods, 2007; Russ, 2006) para discussões mais aprofundadas.

A.2.2 Filtragem no Domínio Espacial

Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999), as técnicas de filtragem no domínio espacial são aquelas que atuam diretamente sobre a matriz de *pixels* que compõem uma imagem digitalizada. No domínio espacial, os valores de um *pixel* podem ser modificados conforme regras que dependem do valor de *pixel* original, ou conforme a combinação ou comparação com outros em sua vizinhança imediata (Russ, 2006).

Os métodos de filtragem que trabalham no domínio espacial que operam diretamente sobre os *pixels*, normalmente utilizam-se de operações de convolução, que consistem no cálculo da intensidade de um determinado *pixel* em função da intensidade de seus vizinhos (Gomes e Velho, 1994). Para isso são utilizados pesos distintos para vizinhos diferentes, cuja matriz de pesos é denominada núcleo de convolução. O valor do *pixel*, resultante da operação, é a soma do produto da multiplicação do núcleo pelos valores da imagem real na vizinhança original ao *pixel*.

Os filtros podem ser classificados em passa-baixa, passa-alta e passa-banda. Por suas características, especial atenção será dada à descrição dos filtros passa-baixa. O efeito visual de um filtro passa-baixa é o de suavização da imagem (*blur*) e a redução do número de níveis de cinza da cena. Filtros de passa-baixa, também conhecidos como filtros de suavização, são empregados na remoção de ruídos de alta frequência espacial em imagens digitais. O efeito de suavização da imagem dá-se pela atenuação das transições abruptas na imagem (Gonzales e Woods, 2007).

O Filtro Gaussiano pode ser usado como um filtro passa-baixa, e é uma aproximação digital da função Gaussiana. É um operador de convolução bidimensional, ou seja, substitui o valor de cada *pixel* da imagem pelo valor de uma função Gaussiana aplicada em sua vizinhança. A forma da distribuição Gaussiana unidimensional é dada pela Equação A.6.

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.6})$$

onde σ é o desvio padrão da distribuição. Assume-se um parâmetro a , denominado média da distribuição ou expectativa estatística, responsável pela distribuição de mudança ao longo do eixo x igual a zero, como ilustrado na Figura A.3.

Em duas dimensões, uma curva Gaussiana isotrópica, isto é, circularmente simétrica, com média zero e desvio padrão σ é ilustrada na Figura A.4 e é descrita pela Equação A.7.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.7})$$

Na suavização por filtragem Gaussiana é utilizada a distribuição bidimensional como uma função de *ponto de espelhamento*, obtida por meio da convolução (Shapiro e Stockman, 2001). Para a realização da convolução, a imagem é alocada como um conjunto de *pi-*

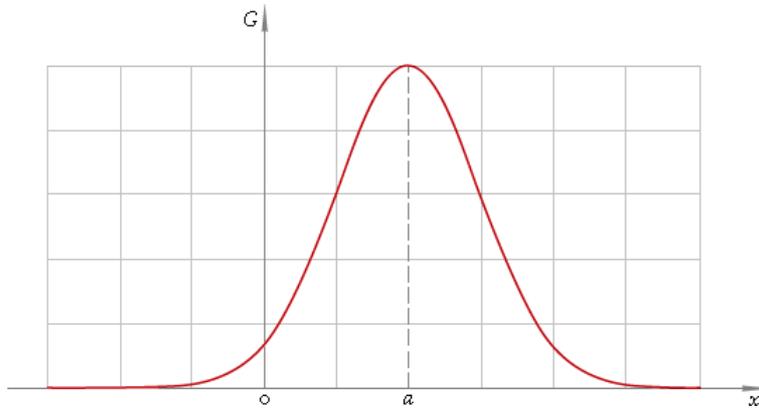


Figura A.3: Distribuição gaussiana unidimensional ((Chernenko, 2011)).

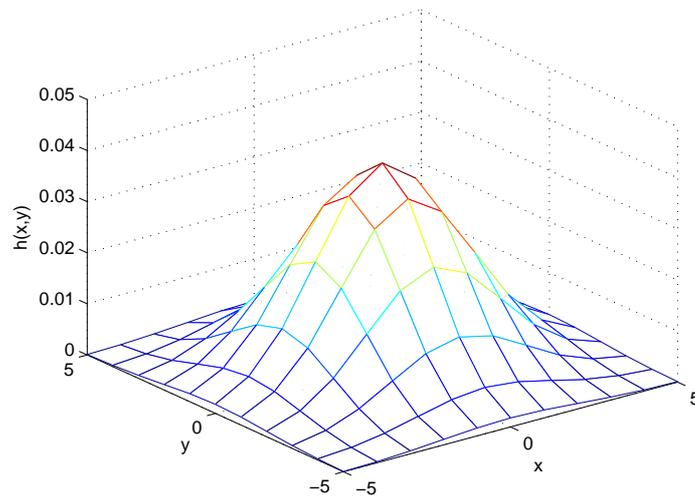


Figura A.4: Forma da distribuição Gaussiana bidimensional.

$xels$ discretos, sendo assim necessário produzir uma aproximação discreta da função de distribuição Gaussiana. Conforme [Gonzales e Woods \(2007\)](#), a distribuição Gaussiana é assintótica e positiva em qualquer valor, portanto, seria necessário um núcleo de convolução infinitamente grande. Na prática, a distribuição se torna zero para qualquer valor mais distante do que aproximadamente três desvios-padrões em relação à média, o que permite então a truncagem da máscara a partir deste ponto. Na notação discreta, a função gaussiana com $\sigma = 1$ pode ser representada pela matriz apresentada em [A.8](#).

$$\frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

O grau de suavização de uma imagem por filtragem Gaussiana é determinado pelo seu desvio-padrão. Desse modo, maiores desvios requerem máscaras de tamanhos maiores para serem devidamente representados. Uma vez tendo-se calculado um núcleo satisfatório, a suavização gaussiana é aplicada usando métodos de convolução conhecidos ([Fisher et al., 2003](#)). A [Figura A.5](#) mostra o resultado da aplicação da suavização gaussiana, resultando em uma imagem mais *borrada*.

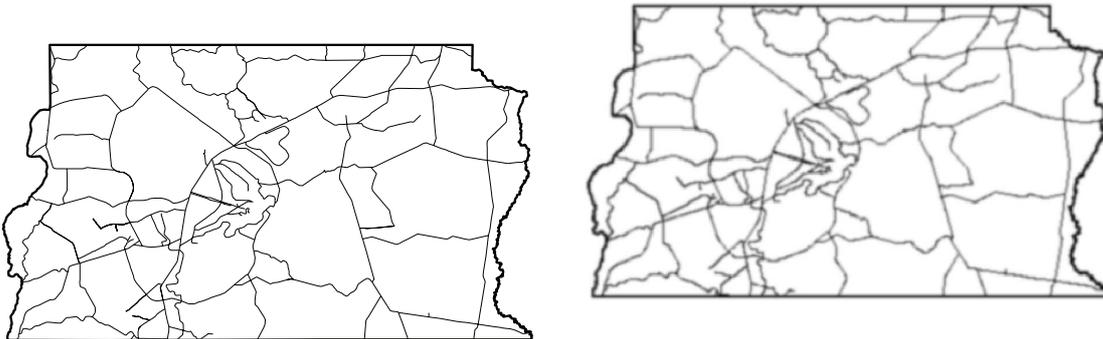


Figura A.5: Filtragem Gaussiana em representação do Distrito Federal. (a) Imagem Original; (b) Imagem após aplicação do filtro com $\sigma = 1$.