UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

Bernardo Marotta de Rezende

VISUALIZAÇÃO DE MUDANÇAS EM SIMULAÇÕES AMBIENTAIS

Ouro Preto, MG
2019

Bernardo Marotta de Rezende

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

Monografia II apresentada ao Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Garcia de Senna Carneiro

Ouro Preto, MG
2019

R467v Rezende, Bernardo Marotta de.
Visualização de mudanças em simulações ambientais [manuscrito] / Bernardo Marotta de Rezende. - 2019.

40f.: il.: color.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Garcia de Senna Carneiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Departamento de Computação.

1. Simulação (Computadores). 2. Modelagem ambiental. I. Carneiro, Tiago Garcia de Senna. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 004.383.4

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Bernardo Marotta de Rezende

VISUALIZAÇÃO DE MUDANÇAS EM SIMULAÇÕES AMBIENTAIS

Monografia II apresentada ao Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em Ouro Preto, julho de 2019.

Prof. Dr. Tiago Garcia de Senna Carneiro
Universidade Federal de Ouro Preto
Orientador

Dr. Joubert de Castro Lima
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Examinador

Dr. Pedro Ribeiro de Andrade Neto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Examinador

O membro externo Pedro Ribeiro de Andrade Neto participou à distância e está de acordo com a aprovação do estudante em sua defesa.

Dedico esse trabalho a todos que de alguma forma contrubuíram para a realização desse projeto.

Agradecimentos

A minha família, minha mãe Marisa, meu pai Ricardo, minha irmã Eduarda, pelo apoio e incentivo durante todos os anos passados

A minha namorada Paula, por tudo que fez por mim em toda essa jornada

Ao professor Tiago e os integrantes do TerraLAB

Aos meus amigos por todos os momentos

E a todos os demais que contribuíram com essa pesquisa

Resumo

Tendo em vista a grande importância da visualização na modelagem e simulação computacional, o presente estudo desenvolve e avalia uma nova abordagem para a visualização de simulações ambientais - a observação direta de mudanças ocorridas nas entidades que fazem parte da simulação. A aplicação e o impacto de três formas de visualização de mudanças são analisadas: mudanças instantâneas, trajetória e mudanças acumuladas. Estas formas permitem ao modelador e aos demais interessados na análise de simulações ambientais reconhecer padrões e dinâmicas que estão presentes no comportamento de modelos computacionais e que permaneciam ocultos nas formas tradicionais de visualização científica. Ao tornar visível aquilo que estava oculto e que, portanto, não era identificado e considerado nas análises, os resultados deste trabalho têm potencial para auxiliar qualquer estudo científico que depende do resultado de simulações computacionais, em especial os estudos em modelagem das interações entre os sistemas sociais e sistemas naturais. Estas novas formas de visualizações foram implementadas como um pacote de código aberto que estende o ambiente de modelagem TerraME e serão liberadas gratuitamente junto com a versão 2.0 deste ambiente.

Palavras-chave: Modelagem ambiental. Visualização de mudança. Simulação computacional. Visualização de padrões.

Abstract

Considering the great importance of visualization in computational modeling and simulation, the present study develops and evaluates a new approach for the visualization of environmental simulations - the direct observation of changes occurring in the entities that are part of the simulation. The application and impact of three ways of visualizing changes are analyzed: instantaneous changes, trajectory and accumulated changes. These approaches allow the modeler and others stakeholders interested in the analysis of environmental simulations to recognize patterns and dynamics that are present in the behavior of computational models but remain hidden in the traditional forms of scientific visualization. By making visible what was hidden and therefore not identified and considered in the analysis, the results of this work have the potential to support any scientific study that depends on the result of computational simulations, specially studies in modeling en simulations of interactions between the social and the natural systems. These new forms of visualizations have been implemented as an open source package that extends the TerraME modeling environment and will be released for free along with its 2.0 version.

Keywords: Environmental modeling. Change visualization. Simulation. Pattern visualization.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – História dos modelos. Fonte: (WAINWRIGHT et al., 2012) 6
Figura 2.2 – Exemplo TerraME. Fonte: (CARNEIRO et al., 2013) 8
Figura 2.3 – Na esquerda, situação inicial, na direita, após algum tempo de simulação. . . 11
Figura 2.4 – Visualização tradicional e de mudança acumulada 12
Figura 2.5 – Visualizações de terrenos 3D. Fonte: (RINK; BILKE; KOLDITZ, 2014) . . 12
Figura 2.6 – Realidade virtual e imersividade. Fonte: (LING; CHEN, 2014) 13
Figura 2.7 – Visualização 3D de uma fábrica de gás. Fonte: (LING; CHEN, 2014) 13
Figura 2.8 – Visualização dos fluxos de temperatura da superfície no globo. Fonte: (TOMINSKI; DONGES; NOCKE, 2011) 13
Figura 2.9 – Visualização dos estados inicial, intermediário e final de uma simulação do modelo de segregação social proposto por Schelling 15
Figura 2.10–Cooperação em colônia de formigas 15
Figura 2.11–Visualização do acúmulo de movimentações das formigas 15
Figura 2.12–Conceitos de visualização de mudanças. Fonte: (ANDRIENKO; ANDRIENKO; GATALSKY, 2000) 16
Figura 2.13–Visualização dos fluxos de poluentes. Fonte: (KALIVARAPU; WINER, 2008) 17
Figura 2.14–Visualizações de fluxos de temperatura e calor. Fonte: (HELBIG et al., 2014) 18
Figura 2.15–Visualizações de fluxos de temperatura e calor. Fonte: (OBERHOLZER; HURNI, 2000) 18
Figura 2.16–Quantidade de vendas por loja de um shopping. Fonte: (HERNANDEZ, 2007) 19
Figura 2.17–Análise de mudança nos pixels da imagem. Fonte: (TOMOWSKI; EHLERS; KLONUS, 2011) 19
Figura 4.1 – Tabela de padrões Game of Life. 25
Figura 4.2 – Mudança acumulada no Game of Life. 25
Figura 4.3 – Movimentação do *glider*. 26
Figura 4.4 – Movimentação do *glider* com zoom. 26
Figura 4.5 – Trajetória de mudança do *glider*. 26
Figura 4.6 – Trajetória de mudança do *glider* com zoom. 27
Figura 4.7 – Jogo Espacial. 28
Figura 4.8 – Acúmulo de mudança em Jogo Espacial. 28
Figura 4.9 – Agente em labirinto. 29
Figura 4.10–Acúmulo de mudança da movimentação do agente 29
Figura 4.11–Passeio aleatório com trajetória de mudança. 29
Figura 4.12–Passeio aleatório com acúmulo de mudança. 30
Figura 4.13–Altimetria da Serra Cabeça de Boi. 30
Figura 4.14–a 31

Figura 4.15–b 31
Figura 4.16–Escoamento de água. 31
Figura 4.17–Escoamento de água com mudança acumulada. 31
Figura 4.18–Desmatamento da Amazônia. 32
Figura 4.19–Mudança acumulada de desmatamento na Amazônia. 32
Figura 4.20–Trajetória de mudança de desmatamento na Amazônia. 33
Figura 4.21–Escoamento de água na Cabeça de Boi, em 3D 34
Figura 4.22–Visualização do *glider* em 3D 34
Figura 4.23–*Blinker* em 3D 35
Figura 4.24–Jogo da vida em 3D 35
Figura 4.25–Desmatamento da Amazônia em 3D 36

Lista de Tabelas

Lista de Algoritmos

1 Change Map22 2 Change Map23 3 Change Map23

Lista de Abreviaturas e Siglas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
API	Interface de Programação de Aplicações
SIG	Sistema de Informação Geográfica
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

Sumário

1 Introdução **1**
1.1 Justificativa 2
1.2 Objetivos 3
1.2.1 Objetivo Geral 3
1.2.2 Objetivos Específicos 3
1.3 Organização do Trabalho 4
2 Revisão Bibliográfica **5**
2.1 Fundamentação Teórica 5
2.1.1 Modelagem Ambiental 5
2.1.2 TerraME 7
2.1.3 TerraME Observer 8
2.1.4 Visualização Científica 8
2.2 Trabalhos Relacionados 9
2.2.1 Trabalhos com contribuição na visualização de modelos ambientais . . 9
2.2.1.1 Visualizações de simulações espaciais em diversos domínios de aplicação 10
2.2.1.2 Visualizações espaciais para domínios de aplicação e paradigmas de modelagem específicos 12
2.2.1.3 Visualizações para simulações sociais e interações entre sociedade e natureza 14
2.2.2 Trabalhos com contribuição em visualização de mudança 16
2.2.2.1 Trabalhos com contribuição na visualização de simulações sócio-ambientais 17
2.2.2.2 Trabalhos com contribuições em outros temas 18
2.2.3 Considerações finais 19
3 Desenvolvimento **21**
3.1 Conceito 21
3.2 Funcionamento das visualizações desenvolvidas 21
3.2.1 Exemplos de uso 22
3.2.1.1 Exemplo 1 22
3.2.1.2 Exemplo 2 22
3.2.1.3 Exemplo 3 23
3.2.2 Documentação 23
4 Resultados **24**
4.1 Estudo de caso 1 -Estudo de padrões no Jogo da Vida 24
4.2 Estudo de caso 2 - Trajetória de mudança no Jogo da Vida 25

4.3 Estudo de caso 3 - Mudanças acumuladas em jogos espaciais 27
4.4 Estudo de caso 4 - Mudança acumulada em modelo de agente no labirinto . . . 28
4.5 Estudo de caso 5 - Trajetória de mudança em passeio aleatório 29
4.6 Estudo de caso 6 - Acúmulo de mudança em modelo de drenagem 30
4.7 Estudo de caso 7 - Acúmulo de mudança em modelo de desmatamento 32
4.8 Estudo de caso 8 - Trajetórias de mudança em modelo de desmatamento 33
4.9 Exemplos do uso de visualização 3D 33
4.9.1 Movimentação do *glider* em 3D 34
4.9.2 Visualização 3D do padrão *blinker* 34
4.9.3 Visualização 3D do Jogo da Vida 35
4.9.4 Visualização 3D de desmatamento na Amazônia 35
4.10 Demais Exemplos 36
5 Considerações Finais 37
5.1 Conclusão 37
5.2 Trabalhos Futuros 37

Referências 38

1 Introdução

A visualização de informações é algo que existe desde os primórdios do mundo, como escritos em paredes de cavernas, hieróglifos e alfabetos. Nos tempos modernos, formas avançadas de visualização que dispõem informações na forma de gráficos, tabelas, diagramas e outras representações tornaram se bastante úteis à análise de grandes volumes de dados (CLEVELAND, 1993). A visualização é chamada de visualização científica quando é aplicada sobre dados científicos e é considerada uma forma interessante de síntese, pois possibilita que grande quantidade de informações seja absorvida (MCCORMICK, 1987).

A visualização tem grande importância na modelagem ambiental, tanto na análise dos resultados finais de uma simulação, quanto nas etapas da construção do modelo, a exemplo da verificação do modelo pela equipe de desenvolvimento e da validação do modelo com os especialistas da área de aplicação. Modelos ambientais são representações computacionais de fenômenos naturais e sociais que permitem simular as interações entre tais fenômenos, com o objetivo de predizer ou entender seus impactos (WAINWRIGHT et al., 2012). São exemplos de fenômenos naturais: propagação de incêndio, processos de erosão, dispersão de doença ou predação. São exemplos de fenômenos sociais: processos de segregação, *gentrificação* ou de cooperação e competição entre indivíduos de uma ou mais sociedades.

Quanto à visualização de dados espaciais resultantes de simulações ambientais, a forma tradicionalmente utilizada é a visualização direta do estado das variáveis que descrevem as entidades presentes em um determinado modelo. Essas variáveis representam propriedades que o modelador julgou relevantes para seu estudo, como o uso ou a cobertura do solo em um modelo de desflorestamento, ou a velocidade de infiltração e velocidade de escoamento superficial da água em um modelo hidrológico. Atualmente, a visualização dos estados correntes das variáveis é estratégia utilizada pelas principais plataformas de software destinadas ao desenvolvimento de modelos ambientais no Brasil e no mundo (CARNEIRO et al., 2013), (CROOKS, 2010), (NETLOGO, 2011). Por isso, essa forma de visualização será doravante chamada de visualização tradicional.

Embora a visualização tradicional permita a observação dos padrões estáticos, dinâmicos e espaciais presentes em uma simulação, como ocorrem no Jogo da Vida (CONWAY, 1970), ocasionalmente, é necessário empregar um tipo diferente de visualização, como aqueles vistos em trabalhos como os de (KALIVARAPU; WINER, 2008), (HELBIG et al., 2014) e (WELLS et al., 2012). Somente assim, pode-se observar dinâmica e padrões existentes nos dados produzidos pelo simuladores, e que, contudo, não foram capturados pela visualização tradicional, permanecendo ocultos e por isso ignorados nas análises.

A literatura traz fortes evidências dos benefícios gerados pelo uso combinado de diferentes

estratégias de visualização, como estudos em visualização científica, (KELLEHER; WAGENER, 2011) e (CUKIER, 2010); em desenvolvimento de modelos ambientais (WAINWRIGHT et al., 2012) , (NOBRE, 2014) e (JAKEMAN; LETCHER; NORTON, 2006); e em visualização de simulações ambientais (LOWRY, 2009), (ROMANACHA; MCKELVYAM, 2015), (WYCISK; HUBERT, 2009), (RINK; BILKE; KOLDITZ, 2014) e (RODRIGUES, 2013).

Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo propor e avaliar uma nova abordagem para a visualização de simulações ambientais, a **observação direta de mudanças** ocorridas nas entidades que fazem parte da simulação. Até o presente momento, foram estudadas três novas formas de visualização de mudanças: mudanças instantâneas, trajetórias de mudança e mudanças acumuladas. Porém, outros tipos de visualização poderão ser desenvolvidos posteriormente.

Para a realização deste trabalho, foram selecionados modelos ambientais (dinâmicos e espacialmente explícitos) que pudessem ser utilizados para demonstrar a capacidade destas novas formas de visualização em explicitar padrões (estáticos, dinâmicos e espaciais) que permaneceram ocultos até então. As novas visualizações foram implementadas como componentes do ambiente de modelagem TerraME (CARNEIRO et al., 2013) que podem ser customizados por uma interface de programação também desenvolvida neste trabalho. Contudo, nada impede que essas novas formas de visualização sejam implementadas por outros ambientes de modelagem.

A escolha do ambiente de modelagem TerraME se deve a este ser fruto de uma colaboração de 16 anos entre as equipes do laboratório TerraLAB (DECOM/UFOP) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que utiliza, juntamente com outras instituições públicas brasileiras, esse ambiente no desenvolvimento de modelos ambientais para avaliar questões e políticas de interesse nacional (LIMA et al., 2016)(LANA et al., 2013)(AMANCIO; CARNEIRO, 2018), além de ter seu código aberto e funcionar para diferentes sistemas operacionais (Windows, Linux, Mac).

Neste contexto, este estudo busca duas principais contribuições. Do ponto de vista científico, desenvolve e avalia uma nova maneira de sumarizar e visualizar os dados resultantes de simulações ambientais, a qual se espera que realce informações e padrões antes não detectados e analisados. Do ponto de vista tecnológico, estende-se o ambiente de modelagem TerraME ao adicionar novos serviços para visualização científica que podem vir a ser incorporados por outros simuladores.

1.1 Justificativa

O uso de modelagem e simulação de sistemas naturais e sociais tem se mostrado uma importante abordagem para avaliar os impactos de ações humanas em grupos sociais ou no meio ambiente (IPCC, 2017) e (NOBRE, 2014). Esta abordagem também é utilizada para simular fenômenos e situações complexas a fim de entendê-los (WILENSKY, 1997) e assim, qualificar computacionalmente políticas e ações que podem vir a ser aplicadas no mundo real (LIMA et al.,

2016).

Com a crescente demanda por modelos ambientais, há também um iminente aumento na necessidade de analisar com mais precisão e qualidade o desmesurado volume de dados resultantes de suas simulações. Segundo (CUKIER, 2010), para o humano, é mais fácil analisar e entender dados que apresentam algum padrão de repetição, de movimento ou geométrico quando apresentado na forma de uma imagem. Quando dados estão dispostos sem nenhum padrão aparente, na maioria das vezes, o analista é impelido a acreditar na aleatoriedade das variáveis visualizadas, para as quais não enxerga qualquer correlação, ou é impedido de chegar a conclusões mais significativas.

Por isso, este trabalho busca desenvolver e avaliar uma forma diferente de se visualizar dados gerados por essas simulações ambientais. A **visualização direta de mudanças** tem potencial para explicitar padrões estáticos, dinâmicos e espaciais que até então permaneciam ocultos e, por isso, torná-los detectáveis e passíveis de análise pelo humano. Consequentemente, os resultados deste trabalho trazem benefícios diretos aos modeladores, que contarão com uma nova ferramenta para verificar e validar os modelos ambientais, além de benefícios indiretos para qualquer pesquisa científica ou gestor socioambiental cujas decisões dependam da análise de dados gerados por simulações computacionais.

1.2 Objetivos

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é projetar, implementar e avaliar novas abordagens para a visualização de simulações computacionais, especificamente, a visualização direta de mudanças em simulações de modelos ambientais dinâmicos e espacialmente explícitos. Estas novas abordagens devem ser implementadas na plataforma de modelagem e simulação TerraME, a fim de que seu emprego possa ser avaliado na visualização de diversos modelos ambientais disponíveis nesta plataforma.

1.2.2 Objetivos Específicos

Atualmente, a plataforma TerraME oferece componentes de visualização, chamados de Observers, que permitem ao usuário visualizar o estado atual de qualquer entidade presente em um modelo em execução, isto é, permitem visualizar dinamicamente o estado de qualquer entidade a cada passo da simulação. Por exemplo, é possível visualizar mudanças no relevo ou cobertura de um terreno, ou visualizar o estado interno e a localização de cada indivíduo que se desloca sobre esse terreno.

Por isso, este trabalho tem como objetivos específicos:

1. Projetar e implementar diferentes formas de visualização direta de mudanças, estendendo os Observers para que também seja possível visualizar dinamicamente, às mudanças ocorridas nos estados de qualquer entidade selecionada.

2. Projetar, implementar e testar uma API (Interface de Programação de Aplicações) sobre a plataforma TerraME que permita a instanciação e customização das visualizações exigindo mínima habilidade em programação, pois a maioria dos usuários do TerraME não são programadores por formação, podendo ser geógrafos, antropólogos, sociólogos, ecólogos, biólogos, etc.

3. Avaliar as diferentes formas de visualização desenvolvidas na análise de simulações de modelos pré-existentes na plataforma TerraME, buscando encontrar padrões que anteriormente não eram observáveis;

1.3 Organização do Trabalho

Os capítulos seguirão a disposição apresentada a seguir:

Capítulo 1: Introdução.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica/ Embasamento Teórico.

Capítulo 3: Desenvolvimento.

Capítulo 4: Resultados e Discussões.

Capítulo 5.1: Conclusão (e trabalhos futuros).

2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica consiste na exposição da fundamentação teórica, em que conceitos chave para o entendimento deste trabalho são apresentados; e na discussão dos trabalhos relacionados, na qual é apresentada uma contextualização desta pesquisa sob a perspectiva do estado-da-arte das pesquisas científicas nesse tema.

2.1 Fundamentação Teórica

Nessa seção, são apresentados conceitos e tecnologias importantes para o entendimento e execução deste trabalho.

2.1.1 Modelagem Ambiental

A modelagem ambiental é um processo que envolve a aplicação de conhecimento de várias áreas do saber para que seja possível estudar, explorar e possivelmente explicar e predizer comportamentos e respostas de organismos vivos ou fenômenos naturais e sociais (WAINWRIGHT et al., 2012).

Um modelo ambiental pode ser definido como uma abstração ou representação matemático-computacional simplificada de um fenômeno ou situação real e que envolve apenas variáveis relevantes ao seu propósito entre todas aquelas que descrevem diferentes aspectos dos sistemas naturais ou sociais. Os modelos ambientais possuem suas raízes no início do século passado, na década de 20, com os modelos de Streeter-Phelps (balanceamento de oxigênio) e de Lotka-Volterra (modelos de interação entre duas sociedades, presa-predador). Nas décadas de 1950 e 1960, houve uma evolução nos modelos de dinâmicas populacionais, assim como modelos hidráulicos mais complexos. Na Figura 2.1, adaptada do capítulo sobre modelos ambientais do livro *Funtamentals of Ecological Modelling* (JORGENSEN; FATH, 2011) pode ser observado como o desenvolvimento dos modelos ambientais evoluiu no passar dos anos:

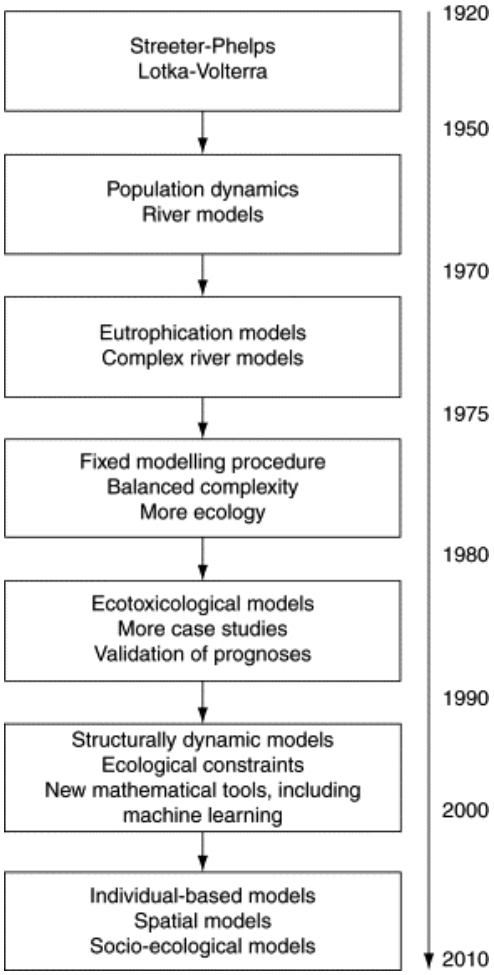

Figura 2.1 – História dos modelos. Fonte: (WAINWRIGHT et al., 2012)

Segundo (WAINWRIGHT et al., 2012), os objetivos gerais ao se construir esses modelos, são:

- Avaliar os impactos de ações humanas no ecossistema
- Garantir através dos resultados a proteção do meio ambiente
- Entender os processos que formam o universo ao nosso redor
- Fazer experimentos que não são possíveis no mundo real
- Apoiar políticas públicas e tomadas de decisão com conhecimento científico.

Em adição aos objetivos gerais, todo modelo ambiental deve ter um propósito específico para o qual foi construído, isto é, qual pergunta científica ou não este deseja responder. A definição dessa pergunta deve ser um dos primeiros passos na construção do conceito do modelo, tendo em vista que este irá guiar todo seu projeto (JAKEMAN; LETCHER; NORTON, 2006). Outros passos na construção do modelo incluem definir as variáveis, a acurácia esperada para o modelo,

os escopos espaciais e temporais, o tempo necessário para sua conclusão e outras especificações que também foram definidas e detalhadas em (JAKEMAN; LETCHER; NORTON, 2006).

Outras fases da construção do modelo que são significativas para esse estudo são as de verificação e validação. De forma sucinta, a verificação é a demonstração de que o formalismo do modelo é correto, isto é, se a lógica mecânica e matemática foi construída corretamente. A validação pode ser definida como algo que nunca pode ser determinado de forma concreta, porém, a partir de relaxamentos, a validação é obtida quando o comportamento do modelo se assemelha ao desejado, ou seja, é aceitável para uso (ORESKES; SHRADER-FRECHETTE; BELITZ, 1994). Geralmente, a validação é realizada pelos especialistas em sua área de aplicação que determinam em que grau o comportamento do modelo se assemelha ao fenômeno real sendo modelado. As técnicas e ferramentas de visualização científicas são apoios essenciais durante a verificação e validação dos modelos.

Ainda de acordo com (WAINWRIGHT et al., 2012), os modelos podem ser divididos em tipos: empíricos, conceituais, e físicos. Modelos empíricos descrevem comportamento observado por variáveis somente com base na observação, sem se envolver com o processo ali apresentado. Eles possuem alto poder preditivo, porém, baixo poder explicativo. Os modelos baseados em regressões estatísticas são os mais comuns modelos empíricos empregados na literatura. Os modelos conceituais tentam explicar o comportamento com base em noções de como funciona o sistema modelado, e possuem melhor poder explanatório. A equação que materializa a Lei da Gravitação Universal de Newton é um bom exemplo de modelo conceitual. Modelos físicos são deduzidos de princípios físicos já estabelecidos e buscam produzir resultados consistentes com tais princípios. Estes modelos tendem a não apresentar alto nível de poder preditivo, porém, possuem a vantagem de serem mais generalizáveis e possuírem alto poder explanatório. Quando animais são utilizados para avaliar o impacto de vacinas para doenças que afetam humanos, este animais estão sendo utilizados como modelos físicos para o corpo humano.

Ao se desenvolver um modelo computacional, é preciso escolher o paradigma de modelagem no qual esse modelo será descrito, isto é, o conjunto de termos, regras sintáticas, significados e regras de inferência que será utilizado pelo modelador para expressar o modelo que ele busca desenvolver. Alguns dos principais paradigmas utilizados na literatura de modelagem ambiental são: Dinâmica de Sistemas (FORRESTER, 1961), Autômatos Celulares (NEUMANN, 1966), Multiagentes (WOOLDRIDGE, 1995) e Álgebra de mapas (TOMLIN, 1990) . Em muitos casos esses paradigmas são combinados no momento da criação de um modelo.

2.1.2 TerraME

O TerraME – TerraME Modeling Environment – (CARNEIRO et al., 2013) é um conjunto de ferramentas que suportam o processo de desenvolvimento de modelos ambientais, isto é, modelos que reproduzem o comportamento de processos naturais e sociais, mostrando suas interações e as mudança que tais interações geram no espaço geográfico. O ambiente tem como

característica o suporte ao uso simultâneo de múltiplos paradigmas de modelagem: Dinâmica de Sistemas, Multiagentes e Autômatos Celulares. Algumas das estruturas básicas presentes no TerraME (conhecidos como tipos ou ainda *subjects*) são as células (*Cell*), espaços celulares (*CellularSpace*), vizinhanças (*Neighborhoods*), trajetória (*Trajectory*), que foram os tipos espaciais, agentes (*Agents*), sociedades (*Society*) e autômatos (*Automaton*), que formam os tipos comportamentais. Célula é uma locação espacial atômica, isto é, seu conteúdo é homogêneo. Tais células compõem espaços celulares, conjuntos de células multi-valoradas que representam uma região do espaço geográfico. Uma vizinhança é um composto de células e o peso entre elas, enquanto uma trajetória é uma seleção de células com ordem definida de caminhamento.

Agentes são entidades autônomas que são capazes de realizar ações e interagir com outros agentes e espaços celulares, o conjunto de agentes é chamado de sociedade, e por fim, o autômato é um processo espacial que possui estados independentes em cada locação. Enquanto o autômato age ao nível do espaço celular, o agente age localmente, a nível de célula.

Além desses, também existem os tipos temporais, que transformam o modelo em uma simulação; e o tipo *Environment*, que permite ao usuário modularizar modelos e organizá-los hierarquicamente fazendo emergir modelos mais complexos por simples composição. Cada *Environment* possui suas próprias dimensões temporais, comportamentais e espaciais com resoluções e extensões definidas pelo modelador. Na Figura 2.2, um exemplo de visualização de uma simulação de desmatamento feita no ambiente TerraME:

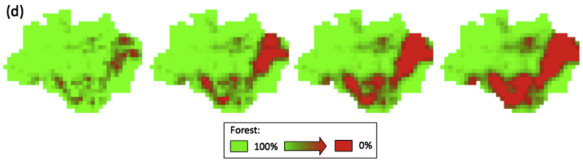

Figura 2.2 – Exemplo TerraME. Fonte: (CARNEIRO et al., 2013)

2.1.3 TerraME Observer

O TerraME Observer (RODRIGUES, 2013) é um serviço de visualização de simulações ambientais. Ele permite que os atributos de um modelo ambiental sejam visualizados dinamicamente durante sua simulação. Possui uma arquitetura extensível e provê um conjunto pré-definido de visualizações: gráficos, mapas, tabelas, etc. Este trabalho estende esse serviço com novas formas de visualização, isto é, a visualização de mudanças.

2.1.4 Visualização Científica

Como dito em (KELLEHER; WAGENER, 2011), "a visualização é um dos componentes mais importantes na apresentação e comunicação de pesquisas, devido a sua habilidade de sintetizar grandes quantidades de dados em gráficos efetivos". É mostrado também que a

visualização tem dois principais propósitos: I) Análise de dados e II) apresentação de dados. O conceito proposto neste trabalho contempla a utilização dessas duas vertentes aplicadas à modelagem ambiental. A diferença entre visualização de dados e visualização científica é que a visualização científica descreve somente visualização de dados físicos e científicos, enquanto a visualização se refere a qualquer visualização gráfica que examina dados em qualquer área do saber. A visualização científica como área de pesquisa busca a efetividade de diferentes tipos gráficos ao exibir dados. No trabalho de (KELLEHER; WAGENER, 2011), são dadas diretrizes para uma visualização de dados efetiva. Algumas delas são a simplicidade ao se criar imagens, selecionar corretamente os eixos da plotagem, como se plotar pontos que se sobrescrevem, como se agregar entradas de dados muito grandes e outras. Essas diretrizes são extraídas de outros estudos e livros, servindo a esse trabalho como guia ao se gerar visualizações para análise, assim como para apresentação.

2.2 Trabalhos Relacionados

Com o objetivo de compreender o panorama atual da área de visualização de simulações ambientais, os trabalhos relacionados encontrados na literatura foram divididos nas seguintes categorias:

- Trabalhos com contribuição na visualização de modelos ambientais;
- Trabalhos com contribuição em visualização de mudanças

Para o presente trabalho é de particular interesse a visualização de simulações de modelos dinâmicos, isto é, modelos computacionais nos quais o tempo aparece como variável independente nas regras comportamentais. Por isso, essas visualizações são animações que mostram o comportamento dos componentes da simulação a cada instante no tempo. Além disso, especial atenção é dada àquelas visualizações que são úteis à análise de simulações explicitamente espaciais, e que independem dos domínios de aplicação a que servem os modelos simulados e dos paradigmas de modelagem em que esses modelos se baseiam.

2.2.1 Trabalhos com contribuição na visualização de modelos ambientais

A abordagem mais comum para visualização de dados de simulações espaciais baseia-se em modelos que a geoinformática criou para representar o espaço geográfico, os quais são: modelo de Objetos e modelo de Campos (CAMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Segundo o modelo de objetos ou geo-objetos, o espaço geográfico é definido como uma coleção de entidades distintas e identificáveis, cujos limites, formas e posição são definidos. Seriam exemplos de objetos: rios de uma bacia hidrográfica, aeroportos de um estado ou lotes de um município.

O modelo de campos (ou geo-campos) representa o espaço geográfico como uma superfície contínua que cobre a área modelada. Ela está em todo o lugar e, por isso, não tem limites ou forma definidos. Exemplos de geo-campos são: mapa de relevo de uma região, que descreve cada ponto do mapa como a altimetria ali detectada; mapa de vegetação, no qual cada ponto deste é associado a um tipo de cobertura vegetal; ou um mapa geoquímico, que representa o teor de um mineral corresponde a cada ponto. É observado que a grande maioria das simulações ambientais trabalha com o modelo de campos, pois esse modelo além de ser mais facilmente utilizado pelo modelador na construção de algoritmos baseados em geometria cartesiana para simular padrões espaciais, é também o modelo que resulta em implementações de menor complexidade e maior desempenho.

Independentemente dos modelos utilizados na representação do espaço geográfico, os trabalhos que contribuíram para a visualização de simulações ambientais foram classificados nas categorias a seguir:

2.2.1.1 Visualizações de simulações espaciais em diversos domínios de aplicação

As principais plataformas utilizadas para o desenvolvimento dos modelos ambientais da atualidade, entre elas TerraME (CARNEIRO et al., 2013), Repast (NORTH; COLLIER; VOS, 2006) e Netlogo (NETLOGO, 2011), fornecem serviços e ferramentas úteis à visualização de simulações em tempo real. Elas permitem que as equipes de desenvolvimento das simulações utilizem animações gráficas para verificar, analisar e validar modelos computacionais baseados em diferentes paradigmas de modelagem: Dinâmica de Sistemas (FORRESTER, 1961), Autômatos Celulares (NEUMANN, 1966) e Multiagentes (WOOLDRIDGE, 1995). Estes serviços e ferramentas já demonstraram sua utilidade na visualização de simulações de diversos domínios de aplicação, desde modelagem de fenômenos naturais (DOHL; KASPAR; LEHNER, 2003), propagação de viroses e outras doenças (LANA et al., 2013) até modelagem de processos sociais (HAMMOND; AXELROD, 2006).

A principal forma de visualização fornecida por estas plataformas é a visualização direta do estado atual das variáveis que descrevem o modelo simulado. Supondo um modelo hidrológico que simula o escoamento superficial da água em um terreno, é possível visualizar mapas animados que ilustram como a "quantidade de água" estocada em diferentes regiões do espaço muda ao longo da simulação. Noutro cenário, em um modelo de desflorestamento, é possível visualizar mapas animados nos quais cada posição do espaço descreve como a "cobertura do solo" alterna localmente de "floresta" para outros tipos de cobertura do solo ("urbano", "agricultura", "pasto", etc), ao longo da simulação. Devido a visualização direta dos estados de uma simulação ser a mais antiga e comum forma de visualização encontrada na literatura, neste texto, será doravante chamada de visualização tradicional.

Apesar da visualização tradicional ser uma forma essencial de visualização, ela pode não ser suficiente para revelar padrões e dinâmicas que emergem nos estados resultantes das

simulações de sistemas complexos. O comportamento desse tipo de simulação pode ser muito mais complexo do que a soma dos comportamentos individuais expressos nas regras dos modelos computacionais, conforme ilustra o modelo Flocking Boids (REYNOLDS, 1987). As regras de um indivíduo (agente) podem expressar somente como ele autonomamente decide mover-se evitando colisões, não se afastando muito e alinhando-se com os vizinhos que pode "enxergar", entretanto, essas poucas regras já são suficientes para fazer com que enxames (cardumes ou bandos) de indivíduos emerjam no nível da sociedade.

A Figura 2.3 evidencia que o padrão de enxame é facilmente notado na visualização tradicional. Contudo, não podemos afirmar que não há outros padrões e dinâmicas escondidas no comportamento do modelo sem antes realizar uma análise exploratória mais completa, visualizando-o a partir de outras perspectivas.

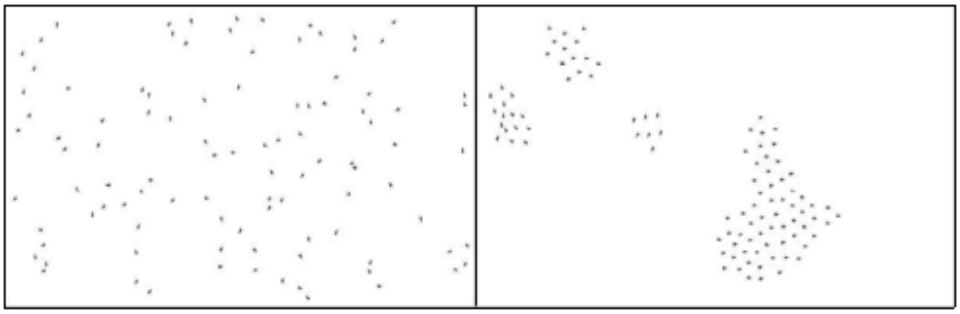

Figura 2.3 – Na esquerda, situação inicial, na direita, após algum tempo de simulação.

Uma vez que alguns padrões e dinâmicas podem permanecer ocultos na visualização tradicional, os modeladores não conseguirão detectá-los e, portanto, não os considerarão nas análises das simulações e, finalmente, não o utilizarão no processo de tomada de decisão. O uso de múltiplas formas de visualização pode explicitar o que antes estava oculto e, por isso, pode beneficiar significativamente qualquer estudo que dependa da interpretação de resultados de simulações. A Figura 2.4 ilustra essa situação. A imagem à esquerda apresenta a visualização tradicional do Jogo da Vida (CONWAY, 1970) - preto é vivo e branco é morto - e a imagem à direita apresenta o mapa das mudanças acumuladas que ocorreram desde o início da simulação. Na imagem à direita, em azul estão regiões onde não ocorreram mudanças, os tons de vermelho escurecem conforme a quantidade de mudança aumenta, e a cor branca indica os locais onde ocorreram picos de mudança. É possível notar a alta repetição de um padrão branco, em forma de cruz, que na visualização tradicional não era aparente. Estes padrões registram os locais onde residiram, por algum tempo durante a simulação, osciladores do tipo *glider*, conforme será discutido à frente.

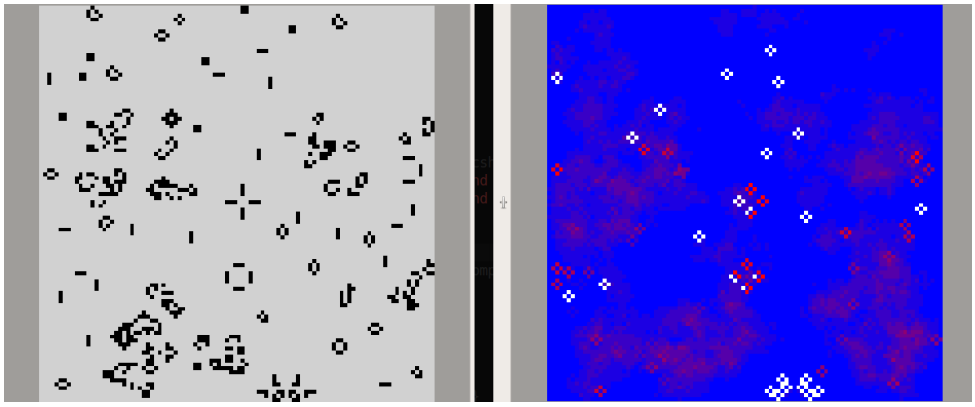

Figura 2.4 – Visualização tradicional e de mudança acumulada

2.2.1.2 Visualizações espaciais para domínios de aplicação e paradigmas de modelagem específicos

Frequentemente, novas formas de visualização são desenvolvidas para que simulações em domínios de aplicação específicos possam ser analisadas em detalhes. Apesar de essas visualizações muitas vezes serem úteis para apenas um domínio da aplicação, os estudos nos quais elas se inserem trazem consigo conceitos e tecnologias que podem ser aproveitados em outros domínios.

Dentre as visualizações de domínio específico, destacam-se *frameworks* que aplicam a visualização tradicional na análise de simulações ambientais. Eles enfocam a visualização tridimensional de terrenos (RINK; BILKE; KOLDITZ, 2014), a visualização de fluxos de energia descritos segundo o paradigmas de Dinâmica de Sistemas (LOWRY, 2009), visualizações na área de indústrias ambientais (LING; CHEN, 2014) e visualizações de estudos climáticos (TOMINSKI; DONGES; NOCKE, 2011). As Figuras 2.5, 2.6, 2.7 e2.8 ilustram visualizações desenvolvidas nestes trabalhos.

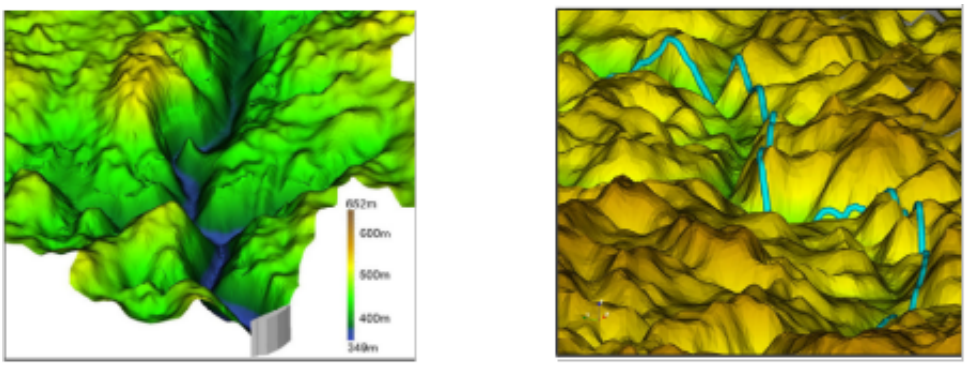

Figura 2.5 – Visualizações de terrenos 3D. Fonte: (RINK; BILKE; KOLDITZ, 2014)

A Figura 2.5 ilustra como a visualização em três dimensões ajuda a compreender terrenos e seu relevo: A terceira dimensão deixa a imagem mais fiel à realidade, facilitando a análise e interpretação. Na Figura 2.5a, é utilizado um mapa de cores para auxiliar na compreensão do

Figura 2.6 – Realidade virtual e imersividade. Fonte: (LING; CHEN, 2014)

relevo, e na Figura 2.5b, o fluxo de um rio é visto em azul claro (levemente fora de posição). A Figura 2.6a ilustra a utilização de formas de imersividade como uma maneira de ajudar no entendimento dos fluxos de corrente em zonas hiporreicas, isto é, regiões de interação entre águas superficiais e água subterrâneas. A Figura 2.6b apresenta a visualização em primeira pessoa da rota a ser percorrida pela câmera virtual. A rota é desenhada sobre o mesmo terreno da Figura 2.5 permitindo seu planejamento. Através das animações produzidas pela câmera virtual, o terreno e os objetos dispostos sobre ele podem ser analisados em detalhe.

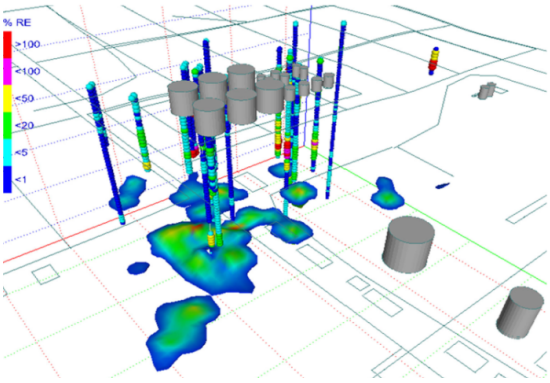

Figura 2.7 – Visualização 3D de uma fábrica de gás. Fonte: (LING; CHEN, 2014)

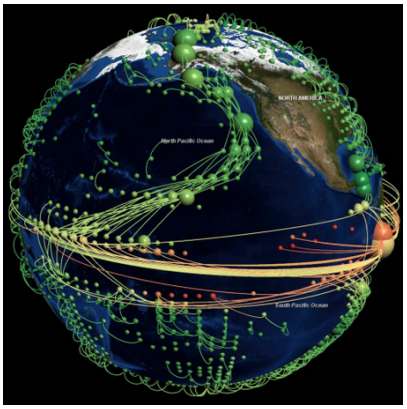

Figura 2.8 – Visualização dos fluxos de temperatura da superfície no globo. Fonte: (TOMINSKI; DONGES; NOCKE, 2011)

Nas Figuras 2.7 e 2.8 são observadas mais duas aplicações da visualização ambiental em domínios de aplicação específicos: indústrias de gás e climatologia. Na Figura 2.7 são vistos tanques de uma fábrica de gás em cinza, e abaixo, como uma mancha, a concentração dos contaminantes que tais tanques geram ao produzir gás. A métrica %RE indica a quantidade de resposta à LIF *(Laser Induced Fluorescence)*, revelando o nível de contaminação, ou seja, maior resposta indica maior nível. A Figura 2.8 mostra a rede climática do planeta em um estado qualquer entre 1860 e 1999, no qual cada vértice é a medida de temperatura do ar em um local e as arestas representam relações de similaridade entre as temperaturas daqueles dois locais. O tamanho de cada vértice representa o grau do mesmo, que é a quantidade de arestas saindo e entrando. Sua cor simboliza o seu valor de intermediação, uma medida de centralidade na rede. O objetivo dessa rede é facilitar o entendimento da relação entre climas nos diferentes lugares do planeta.

2.2.1.3 Visualizações para simulações sociais e interações entre sociedade e natureza

Visualizações para simulações sociais são representações gráficas de modelos nos quais indivíduos interagem entre si e, possivelmente, alteram o estado do espaço sobre os quais estão dispostos. Uma característica dos modelos sociais é a presença da comunicação entre os indivíduos, seja para negociação, cooperação ou competição. Os padrões que emergem nas comunicações ou nas ações de deslocamento ou modificação do ambiente nem sempre são de simples percepção. Por isso, outras formas de visualização podem ser úteis. Exemplos de modelos de interações sociais e sociedade-natureza são:

- Cooperação em colônia de formigas (WILENSKY, 1997);
- Segregação entre sociedades (SCHELLING, 1971);
- Comportamento etnocentrista em sociedades (HAMMOND; AXELROD, 2006) e;
- Estudo de uso do solo na Amazônia (AGUIAR; CÁMARA; ESCADA, 2007).

A Figura 2.9 ilustra três estados da simulação do modelo de segregação social proposto por (SCHELLING, 1971). Neste caso, a sociedade é dividida na classe vermelha e na classe verde, os espaços vazios aparecem em branco. Os indivíduos se movem entre as células de acordo com uma medida de satisfação que varia direta e proporcionalmente com a quantidade de vizinhos pertencente a sua classe. Nesse exemplo, a segregação entre as classes vermelha e verde pode ser observada por meio da visualização tradicional.

A Figura 2.10 retrata os resultados de uma simulação do modelo de colônia de formigas (WILENSKY, 1997). O vermelho representa o formigueiro, em azul os locais com açúcar e o verde mostra o rastro de feromônio deixado quando as formigas carregam o açúcar. As formigas se movimentam aleatoriamente até encontrar o rastro de feromônio, e quando o encontram, o seguem até encontrar açúcar e, em seguida, levam o açúcar para o ninho.

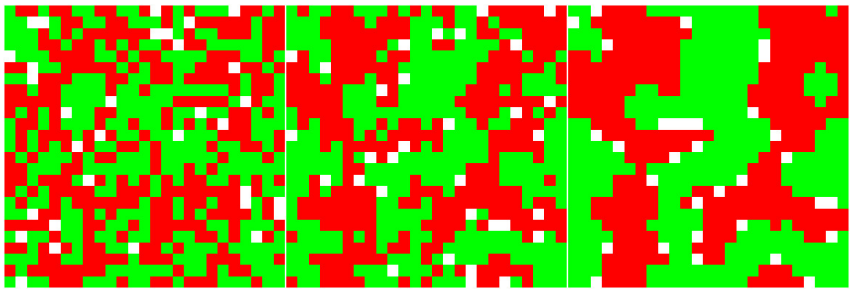

Figura 2.9 – Visualização dos estados inicial, intermediário e final de uma simulação do modelo de segregação social proposto por Schelling

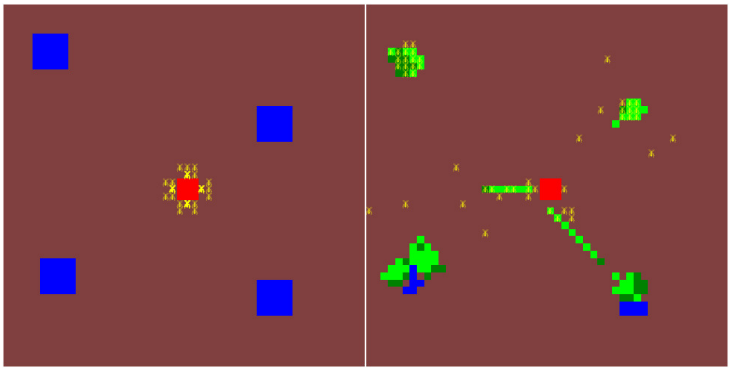

Figura 2.10 – Cooperação em colônia de formigas

Na Figura 2.11 é visto o acúmulo de movimentação das formigas, a cor azul registra regiões de pouca ou nenhuma passagem das formigas. O vermelho varia do escuro para o mais claro para registrar os locais mais percorridos pelas formigas e o branco registra os locais com o máximo de passagens. Mesmo que o movimento das formigas tenha sido definido como aleatório, é possível observar que enquanto houver comida elas passaram a maior parte da simulação caminhando na direção da fonte de alimento e do formigueiro 2.11a. No entanto, na ausência de alimento 2.11b é possível notar, através da visualização da mudança acumulada, que as células mais próximas ao ninho foram as mais percorridas, conforme explica o modelo Random Walk (PEARSON, 1905).

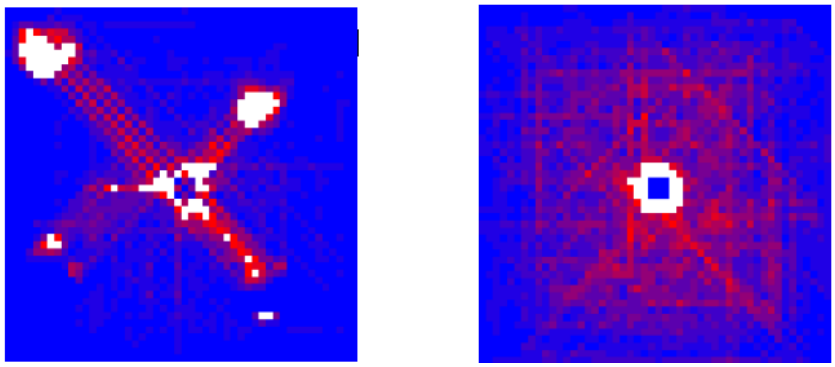

Figura 2.11 – Visualização do acúmulo de movimentações das formigas

2.2.2 Trabalhos com contribuição em visualização de mudança

Nesta seção de texto, são analisados os trabalhos que aplicam um conceito semelhante ao proposto pelo presente estudo, a visualização de mudanças. Estes trabalhos foram agrupados em duas categorias: Aqueles que destinam-se à visualização de simulações sócio-ambientais e os que se destinam a visualização de simulações em geral. O conceito de mudança no decorrer do tempo, similar ao encontrado nos trabalhos de ambas as categorias, foi formalmente definido na Figura 2.12: (ANDRIENKO; ANDRIENKO; GATALSKY, 2000)

Space → **Time ↓**	**Elementary level** (individual locations)	**Regional level** (the whole territory under study and its parts)
Single moment *t*	What value had the attribute *a* at *t* at a given location?	How were the values of the attribute distributed at *t* over the studied region?
Two moments *t1* and *t2* (change)	What is the difference between values of the attribute at *t1* and *t2* at a given location?	**a)** What is the difference between the patterns of spatial distribution of values at *t1* and *t2*? **b)** How are the changes between *t1* and *t2* distributed over the region? E. g. where did the maximum changes occur?
Interval [*t1*,*t2*] (trend)	What happened during [*t1*,*t2*] at a given location? For example, did the values monotonously grow or decrease? Are the changes periodic? When did the maximum change occur?	**a)** How did the spatial pattern of value distribution evolve over time? For example, did areas of concentration of high (low) values keep in their place or move with the time over the territory? Did the patterns repeat periodically? When did the maximum changes of distribution pattern occur? **b)** Is there a common temporal trend for the whole region or for parts of the region, e.g. monotonous increase or decrease? Did changes in adjacent areas occur synchronously or with a time lag? What locations had an outstanding behaviour?

Figura 2.12 – Conceitos de visualização de mudanças. Fonte: (ANDRIENKO; ANDRIENKO; GATALSKY, 2000)

A primeira linha da tabela analisa o estado das variáveis de um modelo, sejam elas unidimensionais ou espaciais, e não diz respeito ao conceito de mudança. Esta linha relaciona-se diretamente ao que chamamos de visualização tradicional. A partir da segunda linha, a noção de mudança descrita na coluna *elementary level* é semelhante àquela utilizada para a visualização de mudanças nesse trabalho, calculada a partir da simples diferença entre estados ou do acumular dessas diferenças em um intervalo de tempo. Na coluna *regional level*, são enunciados conceitos mais amplos de mudança que poderiam incluir a comparação de padrões espaciais registrados em diferentes intervalos de tempo, por métricas que consideram medidas em múltiplas resoluções espaciais ou em múltiplas escalas de tempo, detecção de ciclos, de tendências, etc.

2.2.2.1 Trabalhos com contribuição na visualização de simulações sócio-ambientais

Existe uma maioria de trabalhos especificamente desenvolvidos à visualização de simulações ambientais, provavelmente devido à indústria relacionar-se diretamente com os sistemas naturais para sua exploração ou conservação. Modelos sociais são raros e, em geral, teóricos. Eles servem à avaliação de políticas ou de estratégias de gestão social por meio da análise de cenários simulados de governança ou não-governança. Assim, visualizações específicas a esse tema também são raras. A classe mais comum e bem desenvolvida de modelos sócio-ambientais são os modelos de mudança de uso e cobertura do solo (do inglês, *Land Use and Cover Change*), muito aplicados no Brasil para avaliar políticas para a região Amazônica (XIMENES, 2011). As visualizações aplicadas a esse tema são principalmente fundamentadas nos métodos e técnicas da visualização tradicional, apesar de alguns trabalhos optarem por apresentar os *hotspots* (áreas quentes) de mudanças para resumir em um único mapa os resultados produzidos por diversos cenários simulados (AGUIAR; CÁMARA; ESCADA, 2007).

No tema ambiental, alguns trabalhos permitem a visualização da trajetória, direção e intensidade dos fluxos de energia ou matéria que direcionam as mudanças que alteram os sistema naturais. A Figura 2.13 ilustra uma visualização na qual os poluentes aparecem em azul claro e o fluxo de movimentação destes em amarelo. Os elipsoides em vermelho representam o fluxo de água dos lençóis freáticos (KALIVARAPU; WINER, 2008). Essas visualizações são utilizadas para compreender o fluxo de poluentes em lençóis freáticos e assim tentar amenizar os impactos causados por eles.

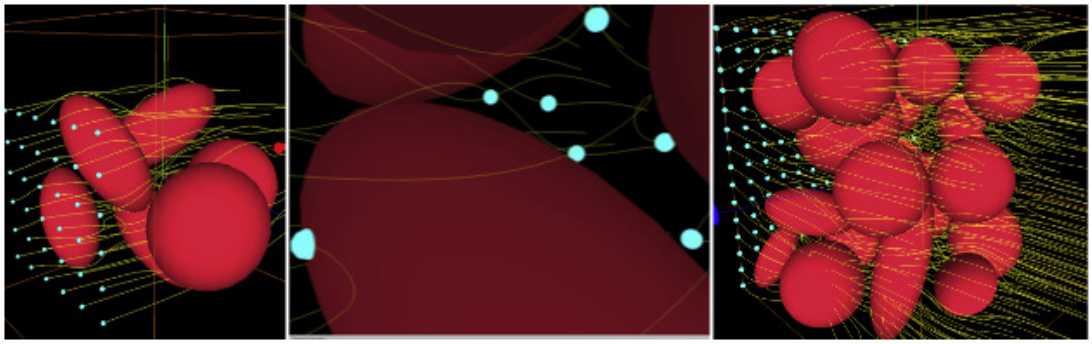

Figura 2.13 – Visualização dos fluxos de poluentes. Fonte: (KALIVARAPU; WINER, 2008)

A Figura 2.14 apresenta exemplos de visualizações de elementos intangíveis (vento, nuvens, fluxo de calor) como objetos tangíveis, de forma a auxiliar na compreensão das informações apresentadas. Nas imagens 2.14a e 2.14b a ideia é observar a umidade em verde e como ela se relaciona com as nuvens, em branco. As imagens 2.14c e 2.14d representam fluxos de ar. A imagem 2.14c mostra em amarelo a direção da corrente de ar acima de um dado terreno A imagem 2.14d utiliza vetores para denotar a direção e a intensidade das correntes de ar, a coloração vermelha registra temperaturas mais quentes e a amarela, temperaturas mais frias. Na imagem 2.14e diferentes fluxos de temperatura são desenhados em diferentes cores: em rosa o

fluxo sensível, em azul o fluxo latente e em laranja o fluxo de calor da superfície.

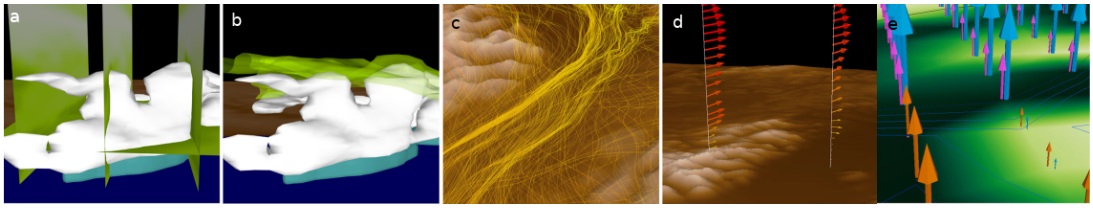

Figura 2.14 – Visualizações de fluxos de temperatura e calor. Fonte: (HELBIG et al., 2014)

Outro emprego da visualização de mudança é observado na Figura 2.15. As imagens 2.15a e 2.15b mostram um mapa da Suíça onde polígonos representam a separação de limites administrativos e as linhas azuis os maiores rios do país. A coloração das regiões indica a quantidade de migração que ocorreu ali em um dado intervalo de tempo: quanto mais azul, menor a migração e quanto mais vermelho, maior. A imagem 2.15a descreve a quantidade de migração entre os anos de 1870 e 1880, enquanto a imagem 2.15b mostra o acúmulo de mudanças entre 1980 e 1990.

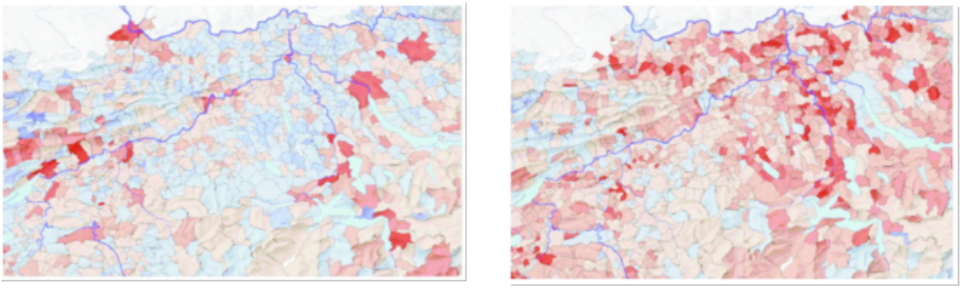

Figura 2.15 – Visualizações de fluxos de temperatura e calor. Fonte: (OBERHOLZER; HURNI, 2000)

2.2.2.2 Trabalhos com contribuições em outros temas

Sistemas de Informação Geográfica geralmente não habilitam facilmente a análise de dados espaço-temporais (HERNANDEZ, 2007). Apesar ainda não estarem disponíveis na maioria dos SIG comerciais que lideram essa indústria, na iniciativa livre há algumas iniciativas para o armazenamento, recuperação e análise tratamento de dados espaço-temporais, entre elas a biblioteca TerraLib (FERREIRA; CAMARA; MONTEIRO, 2014) (FERREIRA et al., 2015). Contudo, os autores não encontram na literatura documentos que identificassem ou explicassem as formas de visualização desenvolvidas nesses trabalhos. A visualização de dados espaço-temporais em SIGs é exemplificada na Figura 2.16 que, ilustra a ideia de visualizar atributos intangíveis como algo tangível. É possível observar, para um dado instante de tempo, a quantidade de vendas de cada loja de uma cidade (2.16a) e de um shopping (2.16b) na forma da altura e cor dessa loja.

As técnica de visualização de mudanças também são empregadas na análise de dados provenientes de sensores remotos, como as imagens de satélite. Algoritmos de detecção de

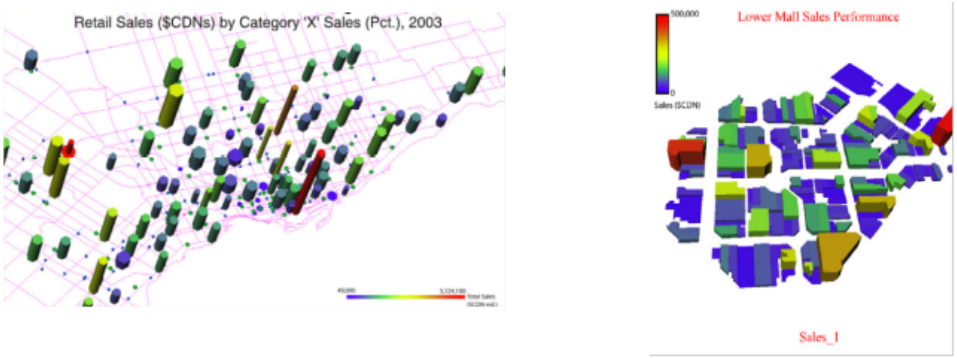

Figura 2.16 – Quantidade de vendas por loja de um shopping. Fonte: (HERNANDEZ, 2007)

imagens são utilizados para avaliar áreas de crise e descobrir ou analisar posteriormente possíveis acontecimentos como desastres naturais ou ataques causados por conflitos (TOMOWSKI; EHLERS; KLONUS, 2011). Esses algoritmos comparam imagens de dois ou mais momentos a fim de visualizar as mudanças naquelas imagens. No exemplo da Figura 2.17, o objetivo é utilizar as mudanças nas imagens para analisar os impactos de um bombardeio. A figura 2.17a foi tirada antes do bombardeio em um vilarejo e a 2.17b após. A figura 2.17 mostra o resultado da aplicação de um algoritmo que detecta as diferenças entre as duas imagens. Pode ser observada pelas linhas em branco os locais nos quais não houve mudança,construções que não foram atingidas.

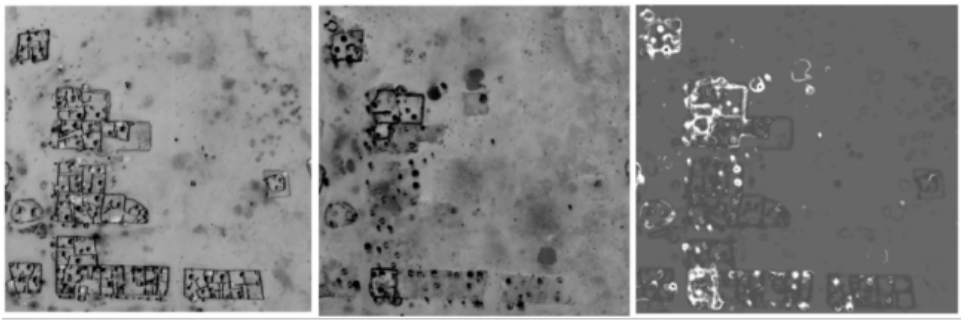

Figura 2.17 – Análise de mudança nos pixels da imagem. Fonte: (TOMOWSKI; EHLERS; KLONUS, 2011)

2.2.3 Considerações finais

Conforme discutido, as plataformas para simulação de modelos socio-ambientais geralmente fornecem a visualização tradicional como única ferramenta para análise das dinâmicas e padrões que emergem durante as simulações. Elas utilizam os conceitos de geo-campo e geo-objeto para representar o espaço geográfico e sobre essa representação imprimem imagens e cores que expressam o estado atual das entidades participantes da simulação. Contudo, sem que possam ser percebidos pelos modeladores, essas simulações produzem dinâmicas e padrões ocultos que poderiam ser revelados por outras formas de visualização, como exemplificado pelas

Figuras 2.4 e 2.11. Assim, o uso em isolado da visualização tradicional pode afetar negativamente a descoberta de conhecimento.

Nas pesquisas realizadas sobre as diferentes alternativas de visualização dirigidas à análise de simulações sócio-ambientais, verificou-se o emprego de técnicas distintas como a visualização 3D, realidade virtual, imersividade, visualização de fluxos, visualização de mudanças e visualização de atributos intangíveis (RINK; BILKE; KOLDITZ, 2014), (LING; CHEN, 2014), (KALIVARAPU; WINER, 2008), (HELBIG et al., 2014), (TOMINSKI; DONGES; NOCKE, 2011). Dentre essas formas de visualização, chamou o interesse a visualização de mudanças devido a sua capacidade em revelar trajetórias, focos (*hotspots*) de mudança e padrões históricos. Além disso, vale ressaltar a aplicabilidade e utilidade dessa forma de visualização em diferentes áreas do conhecimento como por exemplo, estudos climáticos, estudos hidrológicos e análises cartográficas (WELLS et al., 2012) (TOMOWSKI; EHLERS; KLONUS, 2011), (HERNANDEZ, 2007).

Por essas razões, o restante desse texto explora em profundidade o uso da visualização de mudanças aplicada à análise de simulações sócio-ambientais, buscando por vezes combiná-las a outras formas de visualização, com a visualização tridimensional.

3 Desenvolvimento

Neste capítulo, é descrito em detalhes o conceito de visualização desenvolvido neste trabalho e, em seguida, são apresentadas a API e componentes de software também desenvolvidos para demonstrar e avaliar as visualizações em que se aplicam esse conceito.

3.1 Conceito

A abordagem proposta tem a seguinte ideia: Além de visualizar o estado de cada entidade de um modelo durante a simulação, também pode ser visualizada a quantidade de mudança (instantânea, acumulada, trajetória) que ocorre em cada entidade. A expectativa é que estas visualizações sejam úteis na análise de modelos ambientais.

A **mudança instantânea** é definida pela intensidade da mudança em um atributo de uma entidade qualquer em um instante t, é calculada pela subtração do estado passado desse atributo (t-1) a partir de seu estado presente (t).

A **mudança acumulada** mostra a quantidade de mudança que ocorreu em um dado atributo durante toda a simulação, como um histórico de mudanças, e é calculada pela soma dos valores absolutos de todas mudanças instantâneas ocorridas neste atributo.

A **trajetória de mudança** é calculada através do acúmulo de mudanças de um dado atributo de qualquer entidade por algumas unidades de tempo, muito útil para ilustrar os locais percorridos por entidades em movimento. É calculado da mesma maneira que a mudança acumulada, contudo, seu valor decai a cada passo de simulação fazendo com que desapareça totalmente após um certo intervalo de tempo definido pelo modelador.

3.2 Funcionamento das visualizações desenvolvidas

Os componentes de software desenvolvidos neste trabalho implementam uma nova "camada de sofware" posicionada acima do TerraME Observer e possui uma API (Application Programming Interface) intuitiva que permite a instanciação, customização e atualização das visualizações de mudanças. Eles funcionam com uma caixa preta, sem expor a seu usuário a maneira na qual são implementados, exigindo deste habilidades mínimas em programação de computadores. A ideia é que através da chamada de um observer de mudança, internamente, seja chamado um observer pré-existente no TerraME, porém, alguns passos adicionais são computados de forma transparente ao usuário, evitando que o modelador precise se preocupar com o cálculo das mudanças e o foco de sua atenção permaneça na construção do modelo. Esses passos são:

- Para cada atributo que o programador definir, será criado um atributo com o mesmo nome concatenado ao sufixo "Change_", ou seja, se o atributo desejado é "agua", será criado automaticamente um chamado "aguaChange_";
- Será criado um *observer* para cada atributo selecionado;
- A cada passo da simulação, será calculada automaticamente o tipo de mudança especificada pelo modelador: instantânea, acumulada ou trajetória;
- O *observer* é atualizado também a cada step.

3.2.1 Exemplos de uso

Alguns exemplos de utilização da interface são apresentados a seguir. São mostrados usos de diferentes tipos de visualização de mudanças, bem como exemplos de parâmetros que podem ser utilizados em conjunto.

3.2.1.1 Exemplo 1

Algorithm 1 Change Map

```
changeMap{
  target ← cs
  select ← "state"
  type ← "accumulation"
  min ← 0
  max ← 10
  color ← "Blues"
}
```

No pseudocódigo do Exemplo 1, o termo "ChangeMap" é o nome de um tipo de visualização, neste caso, um mapas de mudanças, o atributo "target" é o subject TerraME que se deseja observar, neste caso, um espaço celular chamado "cs", o atributo "select" determina para quais atributos do target as mudanças serão visualizadas (nesse exemplo somente o atributo "state"), "color", "min" e "max" são atributos já presentes nos *observers* atuais e documentados na "ajuda" do TerraME, e, finalmente, o atributo "type" se refere ao tipo de mudança a ser visualizada (instantânea, acumulada ou trajetória).

3.2.1.2 Exemplo 2

O código 2 exemplifica a visualização de dois atributos de um mesmo espaço celular. Ambos são passados para o objeto ChangeMap através do atributo "select" e é gerado um mapa com a mudança ocorrendo em cada um. Também é vista a utilização do tipo de mudança instantânea (*moment*), e um mapa de cores chamado Reds, já definido pelo TerraME.

Algorithm 2 Change Map

```
changeMap{
  target ← cs
  select ← {"cover", "water"}
  type ← "accumulation"
  min ← 0
  max ← 10
  color ← "Reds"
}
```

3.2.1.3 Exemplo 3

Algorithm 3 Change Map

```
changeMap{
  target ← cs
  select ← "state"
  type ← "accumulation"
  max ← 100
  color ← {"yellow", "purple"}
}
```

O uso de cores personalizadas pode ser feito de acordo com o código visto no Exemplo 3. Ao passar mais de um valor no atributo color, no caso amarelo e roxo, será feita uma escala na qual os menores valores são representados em amarelo e os maiores em roxo, gradualmente. Outro detalhe observado é que atributos como “min”, “max” ou “color” possuem padrão, e não precisam ser definidos.

3.2.2 Documentação

A documentação completa com definição de todos os parâmetros e mais exemplos de uso encontra-se em https://github.com/bermr/changesmap. O pacote desenvolvido segue os padrões do TerraME (documentação completa, testes unitários, exemplos...) e pode ser instalado da mesma forma que todos os outros pacotes da plataforma.

4 Resultados

Alguns estudos de caso foram realizados para experimentar e avaliar as visualizações em alguns modelos pré-existente na plataforma TerraME, buscando avaliar a facilidade de uso da API, a exiquibilidade deste projeto e, principalmente, a utilidade dos conceitos e componentes do software desenvolvido neste trabalho.

4.1 Estudo de caso 1 -Estudo de padrões no Jogo da Vida

No primeiro exemplo, o modelo utilizado é o John Conway's Game of Life (CONWAY, 1970). O modelo usa o paradigma de autômatos celulares, e segue as simples regras:

- Qualquer célula viva com menos de dois vizinhos vivos morre de solidão.
- Qualquer célula viva com mais de três vizinhos vivos morre de superpopulação.
- Qualquer célula morta com exatamente três vizinhos vivos se torna uma célula viva.

A partir dessas regras e de uma população viva inicial, a simulação se desenvolve com a aplicação cíclica das mesmas e, desta dinâmica emergem diferentes padrões espaciais e temporais que não podem ser inferidos diretamente a partir das regras do modelo. A Figura 4.1 mostra padrões encontrados no Game of Life sob a perspectiva da visualização tradicional (tempos de 1 a 5). As figuras a direita mostram os padrões que emergem utilizando as visualizações propostas no trabalho. Pode se notar que essas visualizações, em muitos casos, evidenciam informações que se complementam. Enquanto a visualização acumulada mostra o padrão histórico de mudanças, a visualização instantânea mostra o gradiente de mudança, registrando a aceleração de movimento (ou fluxos de energia), e a visualização de trajetória registra a direção e velocidade de movimento (mudança) e o caminho recentemente percorrido.

Na Figura 4.2, é apresentada a visualização de mudança acumulada ao fim de uma simulação de 1000 passos do jogo. Em azul, onde houve pouca mudança, em vermelho (gradualmente) onde houve alguma mudança e em branco onde houve muita mudança. Podem ser observados padrões diferentes, como quatro *pixels* brancos juntos, se assemelhando à uma cruz, que marcam os locais onde padrões oscilatórios que se repetem ciclicamente parados na mesma posição (como *beacons* e *blinkers*), além de padrões como o rastros por onde "vidas" que se movimentam caminharam.

A visualização da mudança acumulada registra os locais (cruzes brancas) em que, em algum instante durante a simulação, ocorreu a presença de padrões oscilatórios no mapa, mesmo que no final da simulação eles já não existam. Os *pixels* em vermelho, formando um galáxia,

Padrão	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 4	Tempo 5	Acumulada	Instantânea	Trajetória
Blinker								
Beacon								
Glider								
4 Blinkers								

Figura 4.1 – Tabela de padrões Game of Life.

registram áreas de muita entropia (calor) onde ocorreram mudança significativas. Por isso, esse histórico pode ser útil para se visualizar, de uma única vez, o resultado final das simulações e, então, analisar todo o ocorrido, sem exigir que o observador tenha que visualizar animações de todos os passos da simulação para identificar os locais onde ocorreram padrões oscilatórios ou *hotspot* de mudanças.

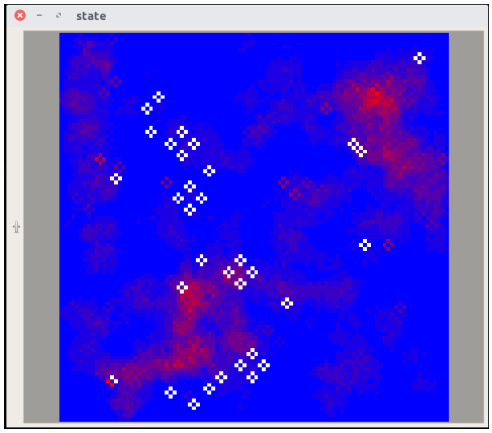

Figura 4.2 – Mudança acumulada no Game of Life.

4.2 Estudo de caso 2 - Trajetória de mudança no Jogo da Vida

Na Figura 4.3, são apresentados alguns instantes de tempo de uma simulação do Jogo da Vida. É possível observar o movimento de uma única instância da forma de vida "*glider*"

movendo-se na direção noroeste, a partir do centro.

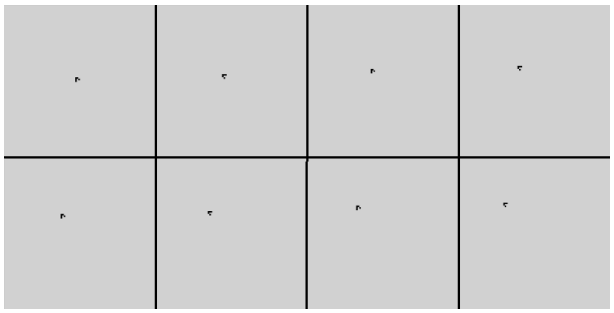

Figura 4.3 – Movimentação do *glider*.

Na Figura 4.4, é visto um zoom de um recorte do espaço, a fim de facilitar a visualização do movimento do *glider*.

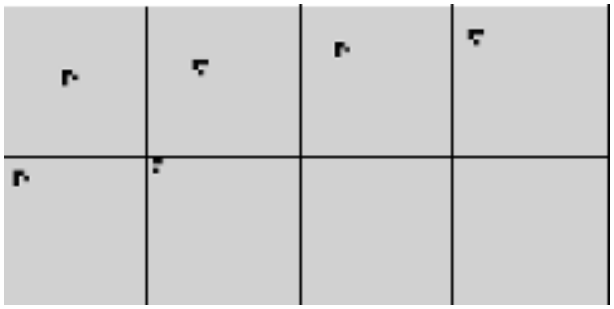

Figura 4.4 – Movimentação do *glider* com zoom.

Através da visualização da trajetória, esse movimento fica mais evidente, como exemplificado na Figura 4.5. Dessa forma, a direção de movimento, velocidade e rastro recente do padrão dinâmico fica registrado na visualização de mudança, diferentemente da visualização tradicional (imagens anteriores).

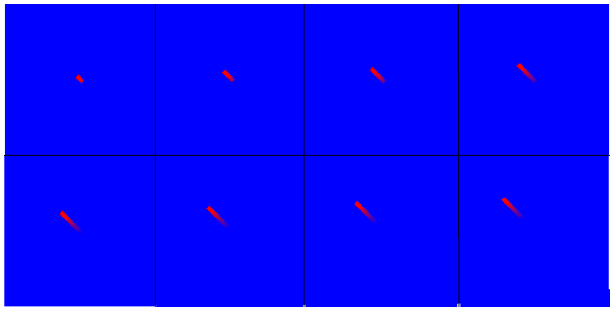

Figura 4.5 – Trajetória de mudança do *glider*.

Na Figura 4.6, é possível ver, usando uma janela de zoom, a movimentação do padrão no espaço

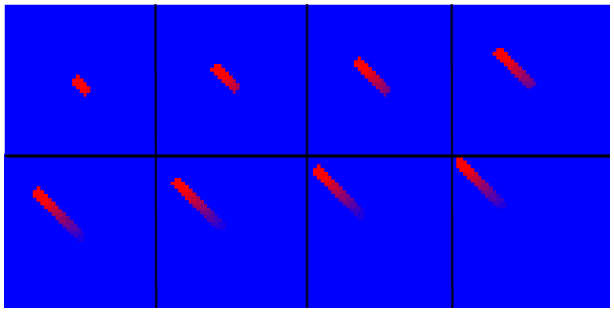

Figura 4.6 – Trajetória de mudança do *glider* com zoom.

4.3 Estudo de caso 3 - Mudanças acumuladas em jogos espaciais

Este estudo de caso mostra padrões de visualização descobertos a partir de visualização de acúmulo de mudança, usando um modelo de jogo espacial proposto em (NOWAK; SIGMUND, 2004). A ideia do jogo é que cada célula do espaço possui uma estratégia a ela associada (igual a sua cor), e joga um jogo não-cooperativo com toda a sua vizinhança. Ao final dos jogos com os vizinhos, essa célula atualiza a estratégia (cor) vencedora, alterando sua estratégia eventualmente. Esse simples modelo espacial produz dinâmicas espaciais complexas como observados em caleidoscópios e em animações fractais.

A Figura 4.7 ilustra a visualização tradicional e a Figura 4.8 apresenta a visualização de acúmulo de mudança para uma simulação em que a célula central começa com a estratégia de não cooperar enquanto todas as outras começam cooperando.

Na visualização tradicional, apenas se pode observar a simetria com relação aos eixos horizontal e vertical passando pelo centro, provavelmente um artefato gerado pela geometria das estrutura de vizinhança. Na visualização acumulada, é possível ver de forma muito mais clara os reais eixos de simetria, ficando evidente eixos diagonais que antes não eram tão óbvios. Inclusive, acontece a descoberta de informação, o padrão acumulado final mostra que os eixos diagonais são regiões de intensas mudanças (retas brancas) e que os demais eixos marcam barreiras onde pouca troca de estratégia acontece. Também pode ser observado que não houveram mudanças no centro e nos cantos do espaço. Estas descobertas não são tão fáceis de serem realizadas ao se analisar a dinâmica do modelo sob a perspectiva da visualização tradicional.

Na visualização tradicional, apenas se pode observar a simetria com relação aos eixos horizontal e vertical passando pelo centro, provavelmente um artefato gerado pela geometria das estrutura de vizinhança.

Na visualização acumulada, é possível ver de forma muito mais clara os reais eixos de simetria, ficando evidente eixos diagonais que antes não eram tão óbvios. Inclusive, acontece a descoberta de informação, o padrão acumulado final mostra que os eixos diagonais são regiões

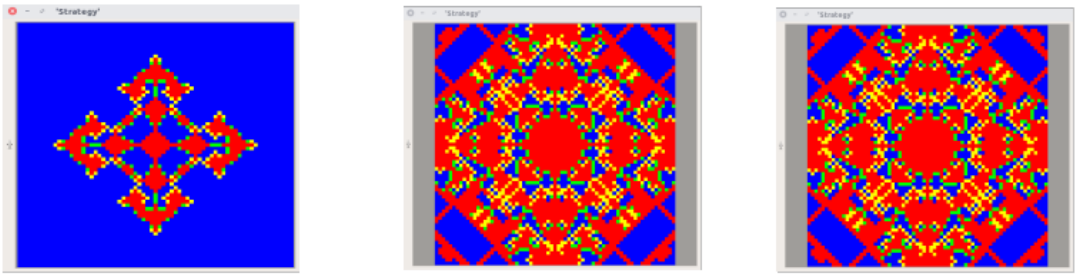

Figura 4.7 – Jogo Espacial.

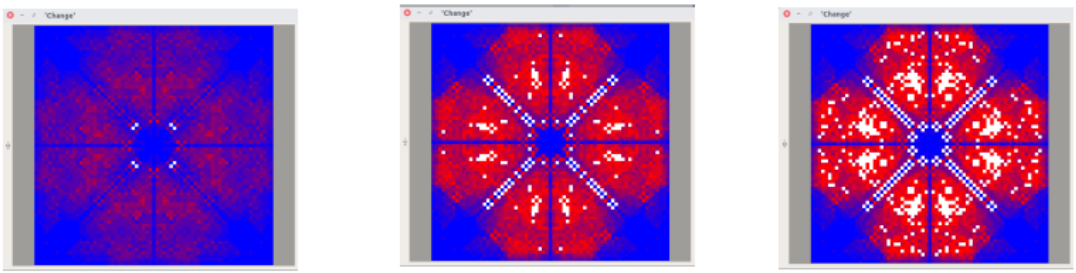

Figura 4.8 – Acúmulo de mudança em Jogo Espacial.

de intensas mudanças (retas brancas) e que os demais eixos marcam barreiras onde pouca troca de estratégia acontece. Também pode ser observado que não houveram mudanças no centro e nos cantos do espaço. Essas descobertas não é tão fácil ao se visual tradicionalmente a simulação.

4.4 Estudo de caso 4 - Mudança acumulada em modelo de agente no labirinto

Um uso da visualização acumulada é ilustrada neste estudo de caso. Em uma simulação de um agente tentando sair de um labirinto, este agente, visto na Figura 4.9 como uma tartaruga, se movimenta aleatoriamente, parando somente quando encontra a saída, representada na imagem pelo ponto vermelho. Ao visualizar o acúmulo de movimentação deste agente com o passar de muito tempo da simulação (4.10), é visto que o agente, mesmo se movimentando aleatoriamente, se manteve na maior parte do tempo próximo de sua posição inicial (ponto preto). Esse comportamento é descrito pelo modelo Random Walk (PEARSON, 1905).

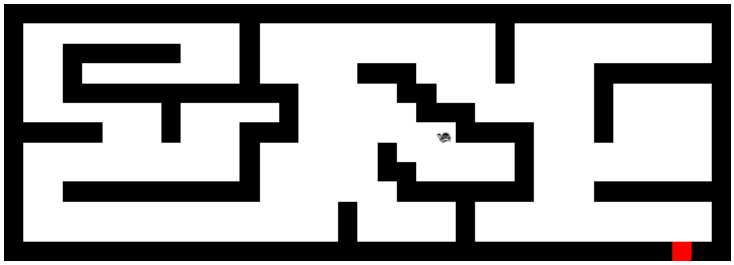

Figura 4.9 – Agente em labirinto.

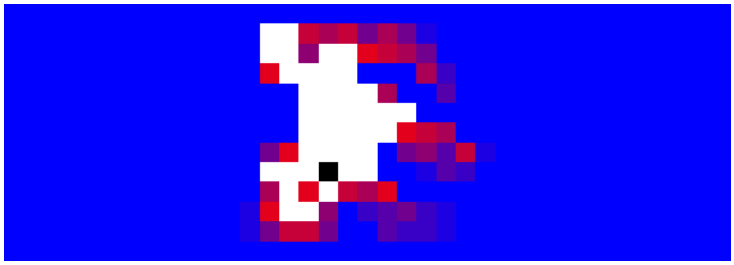

Figura 4.10 – Acúmulo de mudança da movimentação do agente

4.5 Estudo de caso 5 - Trajetória de mudança em passeio aleatório

Este estudo de caso consiste em uma visualização da trajetória realizada por um agente que se movimenta seguindo um modelo de passeio aleatório. Utilizando-se a visualização da trajetória de mudança, é possível visualizar o caminho recente, a direção e velocidade de movimento do agente. A Figura 4.11 ilustra dois momentos diferentes da movimentação desse único agente pelo espaço. Quanto mais escuro, menos tempo tem desde que o agente esteve ali.

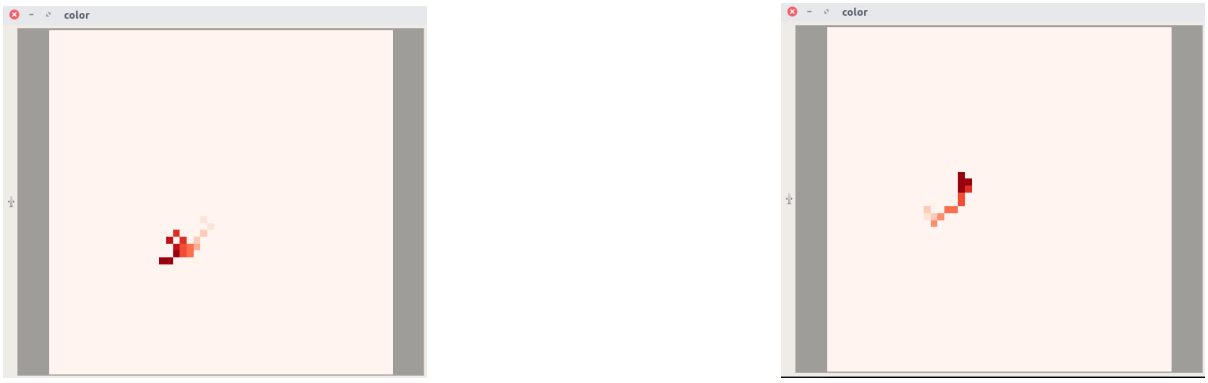

Figura 4.11 – Passeio aleatório com trajetória de mudança.

Na figura 4.12, o acúmulo de mudança registra o histórico dos locais por onde esse único agente passou. A posição inicial do agente é demarcada pelo ponto preto. Na escala de azul (menos) até vermelho (mais), é possível observar os locais que o agente mais visitou. Na cor

branca, é registrado os locais mais visitados (acima de um limiar configurado pelo usuário da visualização). Essa visualização evidencia o comportamento teórico esperado (PEARSON, 1905), de que o agente tende a permanecer próximo da sua posição de origem.

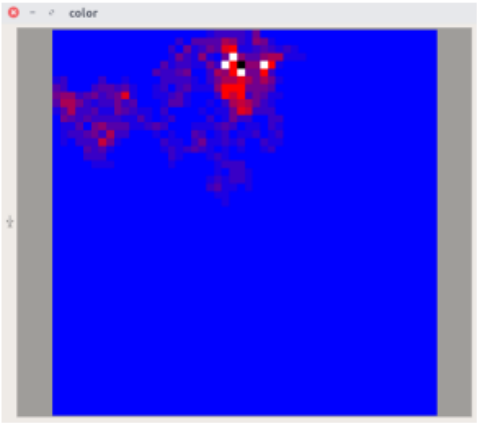

Figura 4.12 – Passeio aleatório com acúmulo de mudança.

4.6 Estudo de caso 6 - Acúmulo de mudança em modelo de drenagem

Este estudo de caso demonstra a utilidade da visualização do acúmulo de mudança em um modelo de escoamento de água. A Figura 4.13 mostra a altimetria da região da Serra Cabeça de Boi, no estado de Minas Gerais, Brasil. O modelo funciona de maneira a simular uma chuva, apenas nas regiões mais altas (*pixels* claros) no instante inicial da simulação. A seguir, a chuva cessa. Então, nos próximos passos da simulação, a água desce morro abaixo (*pixels* escuros).

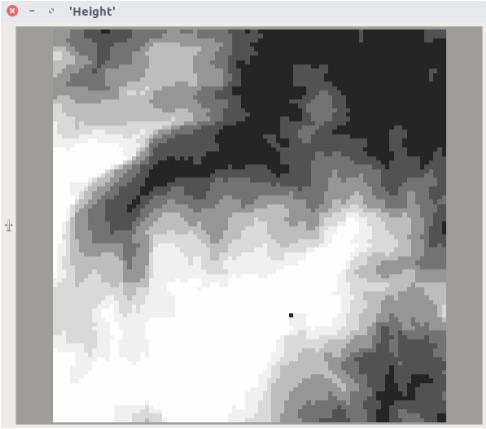

Figura 4.13 – Altimetria da Serra Cabeça de Boi.

A Figura 4.16 ilustra resultados intermediários da simulação. As imagens 4.16a e 4.16b mostram o escoamento da água em dois diferentes instantes de tempo. A primeira imagem

precede a segunda na linha de tempo. A visualização tradicional mostra a quantidade de água em cada local formando fluxos de água que definem córregos que descem as linhas de drenagem do terreno. A topografia plana do topo do morro faz surgir mais acúmulo de água nas regiões mais altas do que nas encostas.

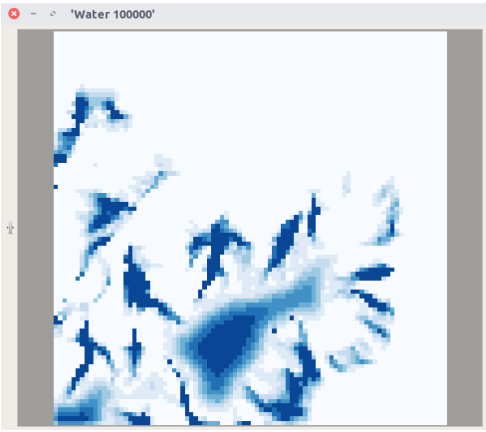

Figura 4.14 – a

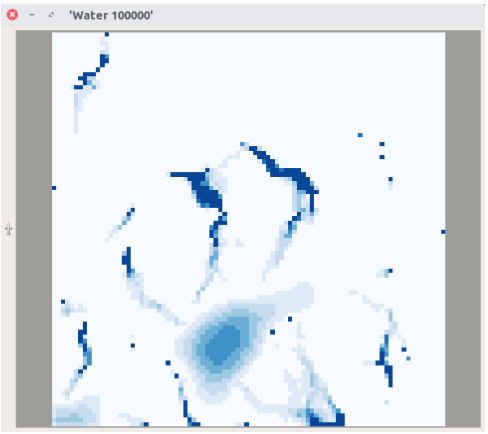

Figura 4.15 – b

Figura 4.16 – Escoamento de água.

Na Figura 4.17, a visualização da mudança acumulada evidencia os locais que de maior fluxo e acúmulo de água durante toda a simulação, além de registrar todos os caminhos seguido pela água, destacando todas as linhas de drenagem do terreno. Essas informações não são tão evidentes na abordagem tradicional.

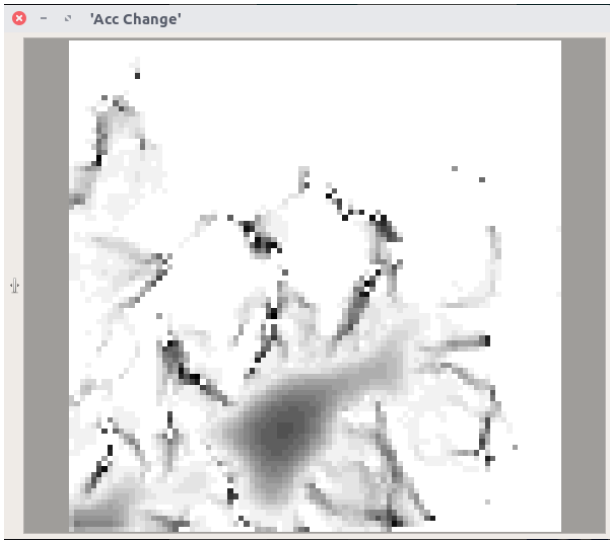

Figura 4.17 – Escoamento de água com mudança acumulada.

4.7 Estudo de caso 7 - Acúmulo de mudança em modelo de desmatamento

Neste estudo de caso, avalia a visualização de acúmulo de mudanças para a análise de uma simulação de desmatamento da floresta amazônica (AGUIAR; CÂMARA; ESCADA, 2007). Cada passo da simulação calcula para cada célula a quantidade de desflorestamento ocorrida naquela localização. Na Figura 4.18, é observada a visualização tradicional da simulação, do vermelho para o verde registra-se áreas menos e mais desflorestadas, respectivamente.

Figura 4.18 – Desmatamento da Amazônia.

Na Figura 4.19, é possível observar o acúmulo de mudança. Nota-se que os locais onde houve mais mudança são as regiões de ocupação já consolidadas aos invés das novas fronteiras de desflorestamento. Além disso, nota-se que ocorre uma mudança de baixa intensidade em toda a região (tom de rosa claro) sem qualquer relação com a geometria das estradas, ferindo pressupostos do modelo. Na visualização tradicional, estes padrões não são evidentes.

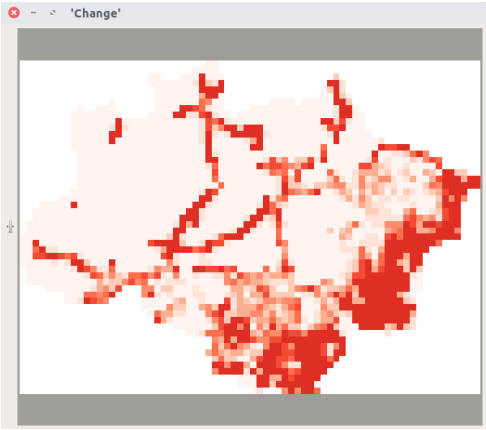

Figura 4.19 – Mudança acumulada de desmatamento na Amazônia.

4.8 Estudo de caso 8 - Trajetórias de mudança em modelo de desmatamento

A Figura 4.20 mostra a visualização das trajetórias de mudança no modelo de desflorestamento da Amazônia, no período de 1900 até 2040. É possível observar que o desflorestamento vem ocorrendo de maneira simultânea em diversos locais, difundindo-se através das estradas que cortam a floresta, conectando a região central à região noroeste. No sudeste, a mudança começa com intensidade no Arco do Desflorestamento (IBAMA, 1997), e se expande em direção ao centro. Esse resultado é fiel ao padrão observado na prática, já que essa região chamada de Arco de Desflorestamento foi designada pelo IBAMA, para fins de monitoramento de queimadas, e corresponde aos locais nos quais o desmatamento ocorre de forma mais intensa (Estados do Pará, Mato Grosso. Mato Grosso do Sul, Maranhão, Amazonas, Rondônia, Acre e Tocantins). A maior mudança é constatada entre os anos de 1980 e 2000 (mapas 4 e 5), e segundo a predição do modelo, ao passar dos anos não haverá mais desmatamento, pois não haverá floresta a ser desmatada (mapa 6).

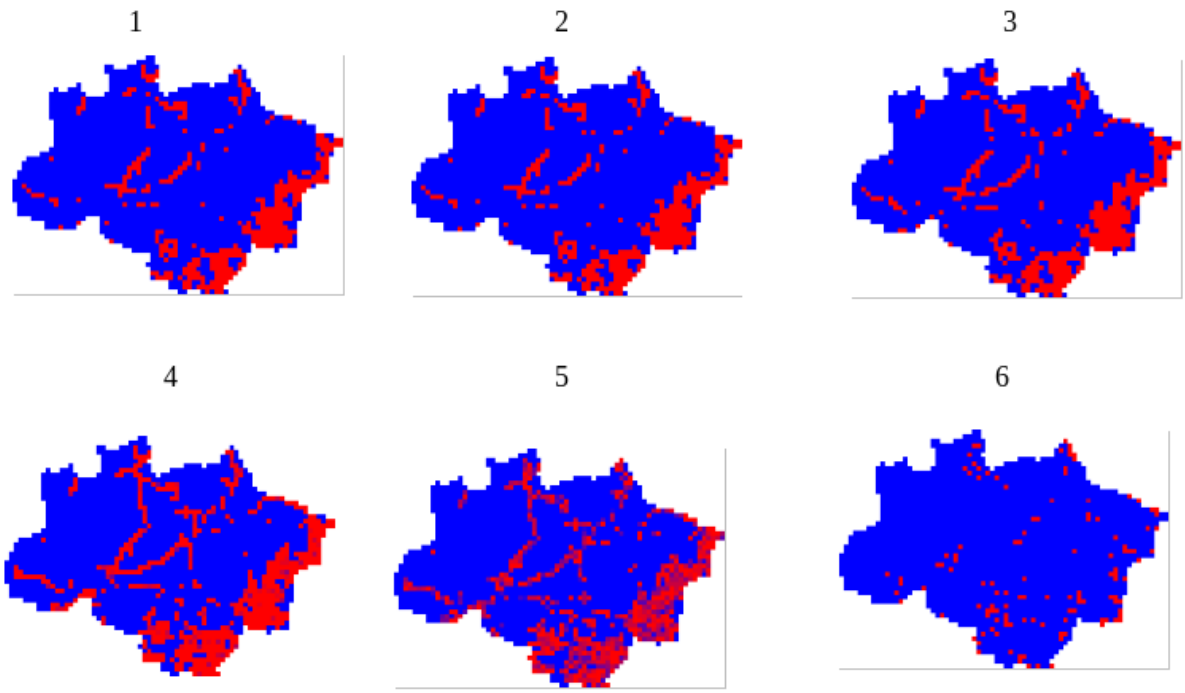

Figura 4.20 – Trajetória de mudança de desmatamento na Amazônia.

4.9 Exemplos do uso de visualização 3D

A visualização em três dimensões por diversas vezes mostrou-se como uma boa ferramenta para a análise de simulações ambientais. Por essa razão, esta seção de texto apresenta alguns experimentos para verificar se a combinação de mapas em três dimensões com visualização de

mudanças pode trazer benefícios ao processo de descoberta de conhecimento durante a análise de simulações ambientais.

A Figura 4.21 mostra uma visualização do estudo de caso 6, escoamento de água na Cabeça de Boi, na qual o relevo é apresentado em três dimensões e a mudança instantânea é utilizada como textura aplicada em tempo real sobre o relevo.

Figura 4.21 – Escoamento de água na Cabeça de Boi, em 3D

4.9.1 Movimentação do *glider* em 3D

O padrão *glider* do Jogo da Vida é utilizado neste estudo. O acúmulo de mudanças da movimentação do *glider* partindo do meio do mapa, similar ao estudo de caso 2, é visto na Figura 4.22. A cor e a altimetria são definidos pela mudança acumulada. A altimetria ajuda a visualizar o caminho do *glider* pelo mapa.

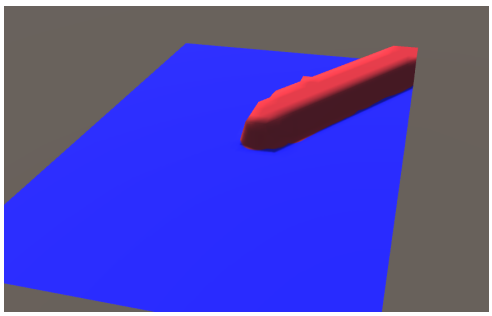

Figura 4.22 – Visualização do *glider* em 3D

4.9.2 Visualização 3D do padrão *blinker*

O padrão *blinker* do Jogo da Vida foi utilizado para demonstrar a visualização de mudanças acumuladas na forma de relevo. O estado da simulação é aplicado diretamente sobre o relevo. Desta forma, quanto mais alto mais mudança houve no local. Lugares mais baixos indicam locais onde não houve mudança. A cor branca indica o estado vivo em um instante de tempo enquanto a cor preta indica o estado morto. A Figura 4.23a mostra a simulação em tempo t, enquanto a

Figura 4.23b mostra em um tempo t+1. Pode ser observado que o único local onde não houve mudança é o centro, posição onde o estado é sempre igual a vivo.

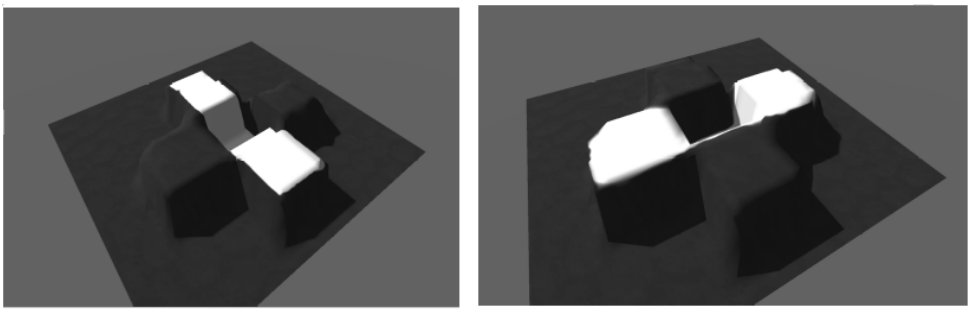

Figura 4.23 – *Blinker* em 3D

4.9.3 Visualização 3D do Jogo da Vida

A Figura 4.24 exemplifica o uso da mudança acumulada para definir o relevo de um terreno. Neste caso, ela indica a quantidade de vezes que um local alternou de vivo para morto. A cobertura mostra o estado atual de cada local, sendo preto vivo e branco morto. As figuras mostram tempos distintos da simulação, de forma crescente da esquerda para a direita.

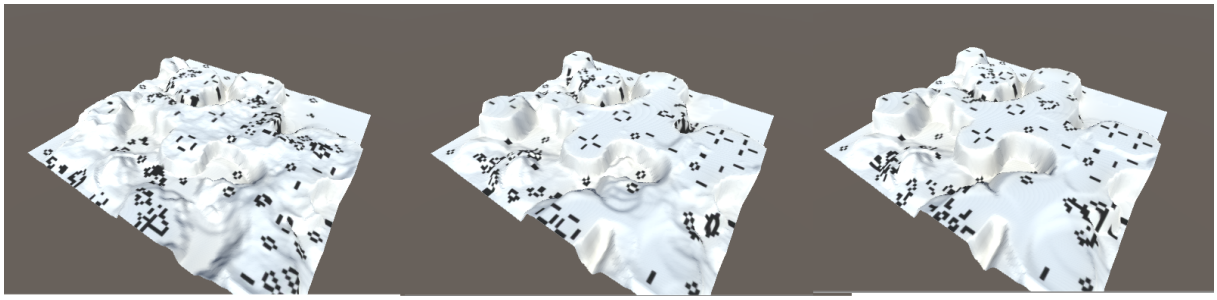

Figura 4.24 – Jogo da vida em 3D

É possível observar, na primeira figura, a formação de montanhas, similar às galáxias vistas na Figura 2.4. Com o passar do tempo, nas figuras 4.24b e 4.24c, os chamados *hotspots* de mudança formam um platô mais alto e se destacam. Uma grande vantagem da visualização 3D é vista nesse exemplo, a possibilidade de observar o estado atual da simulação juntamente com o histórico o da mudanças, revelando os locais onde padrões oscilatórios estiveram e ainda estão.

4.9.4 Visualização 3D de desmatamento na Amazônia

As visualizações criadas no estudo de caso 8, isto é, as mudanças instantâneas do processo de desflorestamento – Figura 4.20, foram combinadas com o acúmulo de mudanças para gerar as amostras da Figura 4.25. Dessa forma, a cobertura do mapa indica a mudança acontecendo a cada instante de tempo (frente de desmatamento), enquanto o relevo apresenta a mudança acumulada

em cada local durante toda a simulação. Através da combinação dessas duas visualizações, são observados fluxos de energia: O relevo registra todo o volume de energia (mudança acumulada) que se difundiu através da rede de estradas, enquanto que a textura revela a intensidade e localização atuais do fluxo de energia (mudança instantânea). É possível notar que nos momentos iniciais as mudanças se difundem pelas estradas, se intensificam até a penúltima imagem, erguendo cordilheiras na regiões por onde passam, enquanto que no momento final as mudanças reduzem sua intensidade e mantêm-se apenas nas periferia destas cordilheiras, perdendo intensidade nas estradas.

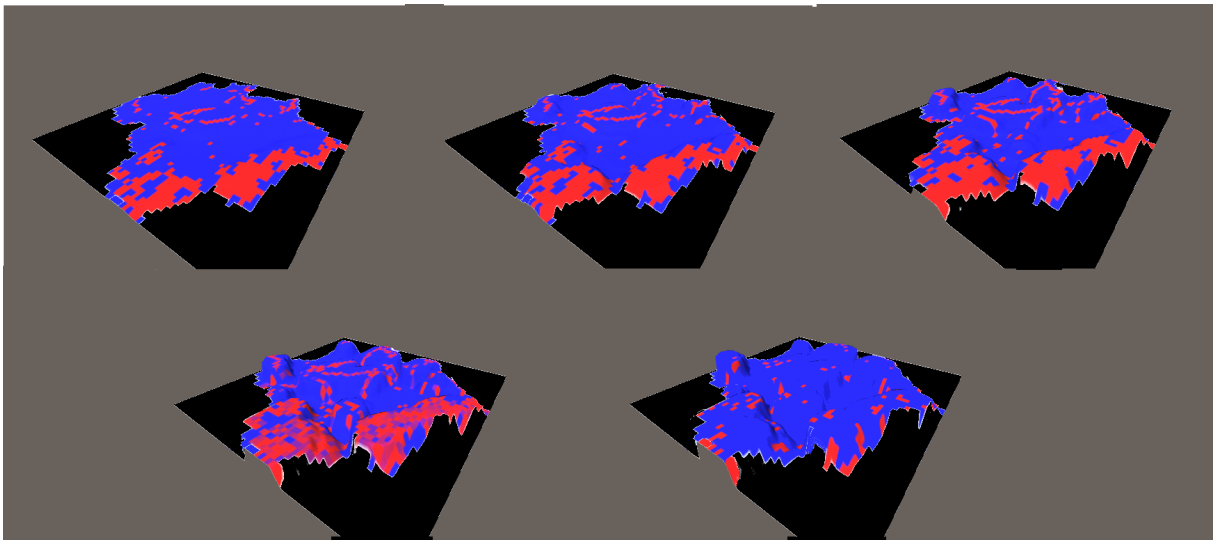

Figura 4.25 – Desmatamento da Amazônia em 3D

4.10 Demais Exemplos

O código fonte dos outros exemplos estudados, bem como da tecnologia criada, encontram-se em um repositório on-line, que pode ser acessado pelo link https://github.com/bermr/change-visu.

5 Considerações Finais

5.1 Conclusão

Verificou-se por meio da análise dos resultados obtidos que a tecnologia desenvolvida e avaliada permitiu demonstrar a viabilidade desta direção de pesquisa e trouxe evidências que permitem aos autores argumentar a favor da utilidade da visualização de mudanças para a detecção de padrões e dinâmicas antes não observados e, portanto, para a descoberta de conhecimento. São evidentes a utilidade e os benefícios da visualização de mudanças para a análise de dados produzidos por simulações ambientais e, por conseguinte, para o apoio à tomada de decisão.

Ao explicitar padrões espaciais e dinâmicos, a visualização de mudanças pode tornar o entendimento de simulações ambientais mais intuitivo, facilitando o processo de definição de políticas para gestão dos sistemas sociais e naturais, quando da necessidade de convencer governos, instituições e cidadãos. Neste sentido, este trabalho tem potencial para beneficiar qualquer estudo que dependa da análise de simulações computacionais das interações entre os sistema sociais e naturais.

Três formas de visualização de mudanças foram desenvolvidas na forma de um pacote de código aberto que estende os serviços de visualização científica da plataforma de modelagem e simulação TerraME, disponível gratuitamente no endereço www.terrame.org. Assim, busca-se promover os avanços em modelagem e simulação ambiental e de suas aplicações. Para o momento, acredita-se não haver qualquer impedimento para que outras plataforma de modelagem e simulação possam também se beneficiar dos resultados alcançados neste trabalho.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalho futuro propõe-se o desenvolvimento de novos tipos de visualização de mudança. Sugere-se estudos com visualizações vetoriais, mapas de autocorrelação estatística, mapa de correlação entre variáveis, correlação espacial, entre outras. Considera-se necessário também que a abordagem proposta seja avaliada em novos domínios de aplicação, além de experimentos que permitam especialistas em modelagem ambiental avaliar a utilidade das visualizações de mudança, possivelmente combinadas com visualizações tridimensionais, quando aplicadas a estudos de casos mais realistas, como aqueles conduzidos pelas instituições de pesquisa e por órgãos governamentais.

Referências

AGUIAR, A. P. D.; CÁMARA, G.; ESCADA, M. Spatial statistical analysis of land use determinants in the brazilian amazonia: Exploring intraregional heterogeneity. Ecological Modelling, 2007.

AMANCIO, A.; CARNEIRO, T. An algebra for modeling and simulation of continuous spatial changes. Journal of Information and Data Management - JIDM, 2018.

ANDRIENKO, N.; ANDRIENKO, G.; GATALSKY, P. Supporting visual exploration of object movement. Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, 2000.

CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. *Introdução à ciência da geoinformação*. [S.l.: s.n.], 2001.

CARNEIRO, T. et al. An extensible toolbox for modeling nature and society interactions. Environmental Modelling Software, 2013.

CLEVELAND, W. S. *Visualizing Data*. [S.l.: s.n.], 1993. ISBN 0963488406.

CONWAY, J. The game of life. Scientific American, 1970.

CROOKS, A. The repast simulation/modelling system for geospatial simulation. 2010. Disponível em: <http://discovery.ucl.ac.uk/15176/>.

CUKIER, K. A special report on managing information. The Economist, 2010.

DOHL, P.; KASPAR, F.; LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. Journal of Hydrology, 2003.

FERREIRA, K.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. An algebra for spatiotemporal data: From observations to events. Transactions in GIS, 2014.

FERREIRA, K. et al. Towards a spatial data infrastructure for big spatiotemporal data sets. 17th Brazilian Symposium on Remote Sensing, 2015.

FORRESTER, J. Industrial dynamics. Massachusetts Institute of Technology Press, 1961.

HAMMOND, R.; AXELROD, R. The evolution of ethnocentrism. Journal of conflict resolution, 2006.

HELBIG, C. et al. Concept and workflow for 3d visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. Environmental Earth Sciences., 2014.

HERNANDEZ, T. Enhancing retail location decision support: The development and application of geovisualization. Journal of Retailing and Consumer Services, 2007.

IBAMA. Conselhos municipais e políticas sociais. IPEA, 1997.

IPCC. Pcc fifth assessment report (ar5) observed climate change impacts database, version 2.01. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2017.

JAKEMAN, A.; LETCHER, R.; NORTON, J. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. Environmental Modelling Software, 2006.

JORGENSEN, S.; FATH, B. Fundamentals of ecological modelling. Developments in Environmental Modelling, 2011.

KALIVARAPU, V.; WINER, E. A multi-fidelity software framework for interactive modeling of advective and diffusive contaminant transport in groundwater. Environmental Modelling Software, 2008.

KELLEHER, C.; WAGENER, T. Ten guidelines for effective data visualization in scientific publications. Environmental Modelling Software, 2011.

LANA, R. et al. Seasonal and nonseasonal dynamics of "aedes aegypti"in rio de janeiro, brazil: Fitting mathematicala models to trap data. Acta Tropica, 2013.

LIMA, T. F. M. et al. Dengueme: A tool for the modeling and simulation of dengue spatiotemporal dynamics. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016.

LING, M.; CHEN, J. Environmental visualization: applications to site characterization, remedial programs, and litigation support. Environmental earth sciences, 2014.

LOWRY, A. Visualizing spatial and temporal dynamics in google earth using powersim. 2009.

MCCORMICK, B. Visualization in scientific computing. SIGBIO Newsl, 1987.

NETLOGO. Netlogo user manual. 2011.

NEUMANN, J. V. Theory of self - reproducing automata. Mathematics of Computation, 1966.

NOBRE, A. O futuro climático da amazônia. relatório de avaliação científica. CCST, INPE, 2014. Disponível em: <http://www.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/futuro-climatico-daamazonia.pdf>.

NORTH, M.; COLLIER, N.; VOS, J. Experiences creating three implementations of the repast agentmodeling toolkit.acm transactions on modeling and computer simulation. ACM Transactions on Modelling and Computer Simulation, 2006.

NOWAK; SIGMUND. Evolutionary dynamics of biological games. Science, 2004.

OBERHOLZER, C.; HURNI, L. Visualization of change in the interactive multimedia atlas of switzerland. Computers Geosciences, 2000.

ORESKES, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BELITZ, K. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. Science, 1994.

PEARSON, K. The problem of the random walk. Nature, 1905.

REYNOLDS, C. A distributed behavioral model. ACM SIGGRAPH computer graphics, 1987.

RINK, K.; BILKE, L.; KOLDITZ, O. Visualisation strategies for environmental modelling data. Environmental Earth Sciences, 2014.

RODRIGUES, A. Terrame observer: An extensible real-time visualization pipeline for dynamic spatial models. Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

ROMANACHA, S.; MCKELVYAM, M. Everview: A visualization platform for hydrologic and earth science gridded data. Computers Geosciences, p. 88–95, 2015.

SCHELLING, T. Dynamic models of segregation. Journal of Mathematical Sociology, 1971.

TOMINSKI, C.; DONGES, J.; NOCKE, T. Environmental visualization: applications to site characterization, remedial programs, and litigation support. International Conference on Information Visualisation. IEEE, 2011.

TOMLIN, C. Geographic information systems and cartographic modeling. Prentice-Hall, 1990.

TOMOWSKI, D.; EHLERS, M.; KLONUS, S. Colour and texture based change detection for urban disaster analysis. Joint Urban Remote Sensing Event, 2011.

WAINWRIGHT, J. et al. *Environmental Modelling : Finding Simplicity in Complexity*. [S.l.]: GSCE Faculty Books, 2012.

WELLS, L. et al. A framework for variation visualization and understanding in complex manufacturing systems. J Intell Manuf, 2012.

WILENSKY, U. Ants model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, 1997. Disponível em: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Ants>.

WOOLDRIDGE, M. Intelligent agents: Theory and practice. Knowledge Engineering Review, 1995.

WYCISK, P.; HUBERT, T. High-resolution 3d spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. Computers Geosciences archive, 2009.

XIMENES, A. Spatial dynamic modelling of deforestation in the amazon. Cellular Automata-Simplicity Behind Complexity. IntechOpen, 2011.