

# Uma Arquitetura Baseada em Sistemas Multiagentes e Bancos de Dados Geográficos para Simulações Sociais e Ecológicas Georeferenciadas

Pablo Souza Grigoletti<sup>1,\*</sup>, Antônio Carlos da Rocha Costa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brasil

<sup>2</sup>Escola de Informática – Universidade Católica de Pelotas (UCPel)  
Rua Félix da Cunha, 412 – 96.010-000 – Pelotas – RS – Brasil

grigoletti@gmail.com, rocha@atlas.ucpel.tche.br

**Abstract.** *This work is situated in the intersection of 4 different areas: Social Simulations, Ecological Simulations, Multi-Agent Systems and Geocomputing. Its main objective is to provide a multi-agent architecture for the development and execution of geographically referenced social and ecological simulations, that is, social and ecological simulations that use geographically referenced data, from a Geographic Database, to support the dynamic modeling of social and/or ecological systems.*

**Resumo.** *Este trabalho está situado na intersecção de 4 áreas distintas: Simulações Sociais, Simulações Ecológicas, Sistemas Multiagentes e Geoprocessamento. Seu objetivo principal é fornecer uma arquitetura multiagente para a criação e execução de simulações sociais e ecológicas georeferenciadas, ou seja, simulações sociais e ecológicas que fazem uso de dados referenciados geograficamente, provenientes de um Banco de Dados Geográfico, para apoiar a modelagem dinâmica de sistemas sociais e/ou ecológicos.*

## 1. Introdução e Contextualização

Estudos sobre as relações entre o homem e o meio ambiente estão cada vez mais presentes na comunidade científica. A computação tem contribuído fortemente, fornecendo ferramentas de simulação para a análise destas relações. Diversos modelos computacionais têm sido desenvolvidos para estudar os complexos sistemas que compõem tais relações.

Um modelo é uma simplificação – menor, menos detalhado, menos complexo – de uma estrutura ou sistema [Gilbert and Troitzsch 1999]. De modo geral, o processo de modelagem faz parte do desenvolvimento de uma simulação.

As simulações ajudam, principalmente, na compreensão de sistemas complexos, nos quais métodos matemáticos puramente analíticos nem sempre são aplicados com sucesso. As simulações de fenômenos sociais e ecológicos têm sido amplamente utilizadas como ferramentas para a análise e o entendimento dos comportamentos emergentes das ações do homem sobre o meio ambiente. Estas simulações focam na modelagem de conjuntos de efeitos de uma população de agentes em um ambiente comum, através do estudo

---

\*Bolsista de Mestrado/CNPq.

da complexidade, emergência, auto-organização e dinâmica originada do comportamento de agentes neste ambiente [Castelfranchi 1998][Ferber 1999].

O uso de Sistemas Multiagentes (SMAs) como ferramenta para a criação de simulações de fenômenos sociais e ambientais potencializa os estudos científicos destas áreas, já que as metáforas de agentes e de sociedades de agentes podem ser utilizadas diretamente na modelagem de sociedades naturais. Desta forma, frequentemente têm sido utilizados modelos baseados em SMAs para a criação destas simulações [Gilbert and Troitzsch 1999].

Por outro lado, o estudo de fenômenos envolvendo o conceito de espaço desencadeou, nas últimas décadas, o desenvolvimento de sistemas computacionais específicos para modelagem e análise do espaço geográfico: os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs). Um SIG nada mais é do que um sistema de informação que torna possível a captura, modelagem, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados referenciados geograficamente [Worboys 1995]. Em um SIG, o componente de armazenamento é comumente denominado Banco de Dados Geográfico (BDG).

A utilização de dados sociais e ecológicos referenciados geograficamente pode potencializar muito o realismo da simulação da ação antrópica, isto é, a ação do homem sobre o ambiente, permitindo tornar explícitas as dependências que podem ocorrer entre os processos sociais e o ambiente físico em que eles ocorrem. Esse tipo de simulação social e ecológica é chamado de simulação social geograficamente referenciada [Boero 2006].

Neste trabalho, é apresentada uma arquitetura de Sistemas Multiagentes para suporte à simulações de fenômenos sociais e ecológicos geograficamente referenciados. Esta arquitetura faz uso de um BDG para fornecer as informações espaciais.

Este artigo está organizado como descrito a seguir. Na Seção 2, resumem-se as motivações e objetivos para o desenvolvimento deste trabalho. Os resultados de uma análise dos trabalhos correlatos são apresentados na Seção 3. A arquitetura proposta é descrita na Seção 4. A Seção 5 traz um estudo de caso realizado no protótipo desenvolvido. As considerações finais são destacadas na Seção 6.

## **2. Motivações e Objetivos**

Dentre as principais motivações para o desenvolvimento desta arquitetura de simulação destacam-se:

- segundo [Okuyama 2003], na área de SMAs, e conseqüentemente nas simulações sociais baseadas em SMAs, a modelagem e a representação do ambiente em que os agentes estão situados e através do qual irão interagir é um aspecto extremamente importante, no entanto pouco explorado. Nos sistemas reativos os agentes não possuem memória e, neste caso, o ambiente tem um papel fundamental, pois é apenas a percepção deste que permite aos agentes tomarem suas decisões. Já em sistemas cognitivos, os agentes possuem uma representação interna do ambiente no qual estão situados. Neste caso, estes agentes tomam suas decisões baseados em mudanças que a percepção do ambiente causa em sua representação interna. Desta forma, segundo [Okuyama 2003], a modelagem do ambiente é importante tanto para os agentes reativos quanto para os cognitivos;

- há algum tempo, Autômatos Celulares (ACs) freqüentemente eram utilizados na representação do espaço, em modelos de simulação. No entanto, a fundamentação teórica dos ACs tradicionais não possibilitava que os autômatos das células se deslocassem, apenas as informações trocadas entre eles. Já utilizando uma abordagem baseada em agentes, é possível que as informações e os próprios autômatos (neste caso, os agentes) se movimentem;
- historicamente, o Geoprocessamento enfatizou a representação de fenômenos espaciais de forma estática, pois, nesta área, a principal abstração utilizada é o mapa. No entanto, diversos fenômenos espaciais são dinâmicos e as representações estáticas não os capturam de forma adequada. Sendo assim, abstrações capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos ainda são necessárias nesta área [Pedrosa and Câmara 2004];
- reforçando a necessidade de modelar o espaço e os fenômenos dinâmicos atuantes sobre este, [Santos 1996] descreve o espaço como indivisível dos seres humanos que o habitam e que o modificam a todo momento.

Com base nestas motivações, o objetivo principal deste trabalho é fornecer uma arquitetura, baseada nos conceitos de Sistemas Multiagentes e de Bancos de Dados Geográficos, para a criação e execução de simulações sociais e ecológicas georeferenciadas. Pretende-se analisar e explorar as vantagens de integrar as áreas de SMAs e BDGs no contexto da criação de modelos e da realização de simulações sociais e ecológicas, focando na representação espacial das entidades existentes em um ambiente físico.

### 3. Análise dos Trabalhos Correlatos

Visando identificar certas características importantes no desenvolvimento de uma arquitetura para criação e execução de simulações, foi realizada uma análise das características de algumas das principais plataformas de simulação baseadas em agentes: (i) Swarm [Minar et al. 1996], (ii) Repast [North et al. 2006], (iii) SeSam [Klügl et al. 2006], (iv) NetLogo [Tisue and Wilensky 2004], (v) OBEUS [Torrens and Benenson 2005] e (vi) SMA-SIG [Gonçalves 2003]. Os principais resultados desta análise são descritos a seguir:

- dificilmente as plataformas fornecem funcionalidades mais abstratas para a criação de comportamentos de movimentação para as entidades. No entanto, é importante salientar que tais funcionalidades são necessárias para a obtenção de simulações mais próximas da realidade;
- a conexão dinâmica com um BDG permite um melhor aproveitamento dos dados geográficos, facilitando assim a realização de consultas espaciais complexas;
- estruturas que facilitem a criação dos modelos são necessárias para que usuários de outras áreas não necessitem de profundos conhecimentos em programação;
- não basta que as plataformas possibilitem a modelagem contínua do ambiente e que as entidades possuam atributos geográficos. É necessário desenvolver percepções e comportamentos que considerem tais características;
- é necessário que funcionalidades para a comunicação entre as entidades sejam disponibilizadas nas plataformas de simulação;
- a utilização de um escalonador de eventos discretos no tempo facilita a análise das simulações, permitindo a verificação de informações a cada instante de tempo.

Sendo assim, se faz necessário o desenvolvimento de uma arquitetura que reúna as características positivas e que também consiga suprir as necessidades e deficiências identificadas nesta análise.

## 4. Arquitetura Proposta

Na arquitetura proposta, existem dois tipos básicos de entidade: agentes móveis (entidades que podem se deslocar) e agentes fixos (entidades que não podem se deslocar). Desta forma, tanto agentes móveis quanto fixos ocupam um lugar no espaço. Tais entidades são especializadas de acordo com sua forma geométrica: agente ponto, agente linha e agente polígono. Existe um tipo especial de entidade que não possui forma (nem ocupa lugar no espaço) e é utilizado para coletar informações das simulações. As formas de representação das entidades estão diretamente relacionadas com as utilizadas nos BDGs para representar vetorialmente os objetos do mundo real.

A arquitetura proposta é constituída basicamente por entidades organizadas em camadas. Esta organização objetiva facilitar a modelagem do sistema, não interferindo na interação entre as entidades. Em uma visão abstrata desta arquitetura, pode-se identificar três camadas principais:

- **camada social:** contém as entidades da sociedade que se deseja representar;
- **camada espacial:** contém as entidades do ambiente que se deseja representar;
- **camada auxiliar:** é uma camada opcional. Contém entidades auxiliares que objetivam facilitar o desenvolvimento do modelo e também “observar” as simulações a fim de coletar dados para a criação de estatísticas. Geralmente, estas entidades não existem no modelo teórico desenvolvido pelos especialistas interessados na simulação.

Em algumas ocasiões as camadas social e espacial podem ser unificadas e representadas em uma única camada. Esta representação única reforça a idéia de [Santos 1996], na qual o espaço geográfico é descrito como indivisível dos seres humanos que o habitam e que o modificam a todo momento. Esta caracterização objetiva contrapor os elementos de composição do espaço (os objetos geográficos estáticos que representam o mundo real) aos condicionantes de modificação da estrutura deste espaço (as ações humanas e os processos físicos ao longo do tempo).

No momento da criação das entidades, são definidos a forma, a localização, os atributos, a percepção e o comportamento de cada uma. Neste contexto, a localização e alguns atributos são dados provenientes do BDG. A forma, o comportamento, a percepção e outros atributos são definidos pelo usuário, como ilustrado na Figura 1. Sendo assim, *as entidades de uma simulação representam dinamicamente os dados estáticos do BDG.*

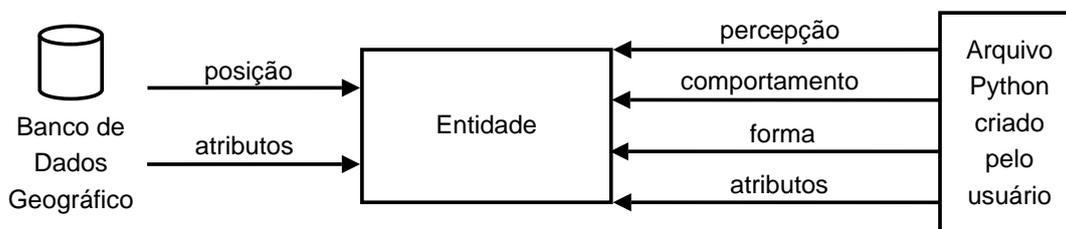


Figura 1. Composição de uma entidade.

O escalonamento das entidades é baseado em eventos discretos no tempo, devido as facilidades apresentadas anteriormente, e pode ocorrer de dois modos: ordenado e aleatório. Baseado nos problemas existentes na área de escalonamento apresentados em

[Michel et al. 2001], a criação destes dois modos de escalonar as entidades é necessária para garantir que a ordem de execução não influencie nos resultados das simulações.

O comportamento das entidades não é especificado *a priori*, objetivando proporcionar uma maior liberdade aos usuários. Este comportamento é definido utilizando-se a sintaxe da linguagem Python, tão simples que é quase considerada um pseudo-código. A simplicidade da linguagem Python facilita muito na criação (programação) do comportamento das entidades, já que é uma linguagem de altíssimo nível (VHLL - *Very High Level Language*). No comportamento podem ser definidas e/ou modificadas ações e percepções.

Entidades reais se movimentam no espaço e assim conseguem explorar determinados locais do ambiente e ter acesso a características inerentes a determinadas regiões. Sendo assim, uma entidade pode realizar ações diferentes em locais diferentes. Desta forma, pela necessidade de se obter uma maior conformidade com a realidade, esta arquitetura fornece comportamentos de movimentação de alto nível de abstração, como os apresentados em [Reynolds 1999].

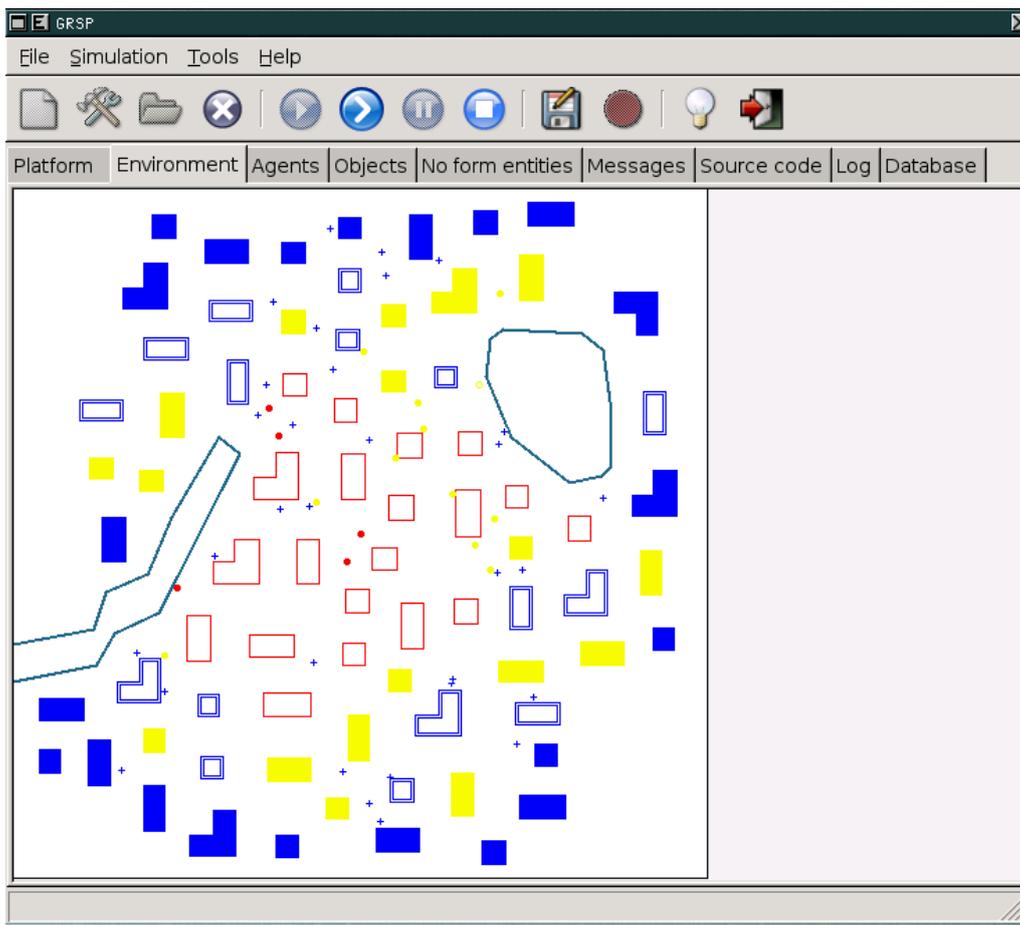
A integração com o BDG ocorre de forma dinâmica. Sendo assim, o acesso aos dados geográficos é feito em tempo de execução (durante uma simulação) e uma vasta gama de operadores e funcionalidades do BDG pode ser utilizada pelas entidades. Neste contexto, as ferramentas, técnicas e estruturas existentes na área de Geoprocessamento são utilizadas nas simulações para fornecerem informações geográficas precisas das entidades, possibilitando a criação de um modelo espacial mais robusto.

Existe a possibilidade de dois ou mais agentes móveis serem definidos como adjacentes. Ocorrendo isto, a movimentação e a mudança de forma de um destes agentes resulta na modificação da forma dos adjacentes. A motivação principal para o desenvolvimento desta funcionalidade é facilitar a criação de agentes que possuam limites adjacentes, tais como divisões territoriais de bairros e cidades, a modelagem de margens de lagos, a divisão de áreas de campo, etc. Nestas entidades a modificação de um determinado limite em um agente produz automaticamente a modificação dos limites de seus agentes adjacentes.

Também são definidas diversas formas de percepções para as entidades (por distância, por tipo de entidade, por camada e por entidade). Além disto, a arquitetura permite que a comunicação entre as entidades ocorra de forma direta, por troca de mensagens, ou indireta, utilizando uma estrutura de dados compartilhada (*blackboard*).

Um protótipo foi desenvolvido, baseado nesta arquitetura, objetivando possibilitar a melhor avaliação das suas características e funcionalidades. Este protótipo foi desenvolvido fazendo uso de diversas ferramentas computacionais, dentre as quais destacam-se: *(i)* linguagem de programação Python, *(ii)* SGBD PostgreSQL, *(iii)* extensão PostGIS e biblioteca GEOS (utilizadas para fornecer ao SGBD a capacidade de manipulação de dados geográficos no formato vetorial, de acordo com o padrão OGC-SFS [Open Geospatial Consortium 2007]). A seguir, na Figura 2, é apresentada a interface gráfica deste protótipo.

Neste protótipo foram realizadas diversas simulações de processos sociais e ecológicos. Uma destas simulações é apresentada resumidamente a seguir, na forma de um estudo de caso.



**Figura 2.** A interface gráfica permite o controle das simulações, a visualização de informações das entidades, do seus posicionamentos, de informações sobre a comunicação, bem como a visualização do arquivo fonte, arquivo de log e informações do BDG.

## 5. Estudo de Caso

Este estudo de caso foi criado com base em algumas idéias do modelo Expert-Cop [Vasconcelos and Furtado 2005], no qual são criadas simulações sobre a alocação de policiais em regiões urbanas, objetivando verificar o comportamento da criminalidade naquelas regiões. Desta forma, neste estudo de caso, são representadas as ruas e quadras de uma determinada região de uma cidade qualquer. Nesta região, existem algumas delegacias e também um presídio central. Nas ruas circulam policiais e criminosos e o objetivo dos policiais é capturar os criminosos.

### 5.1. Modelagem Realizada

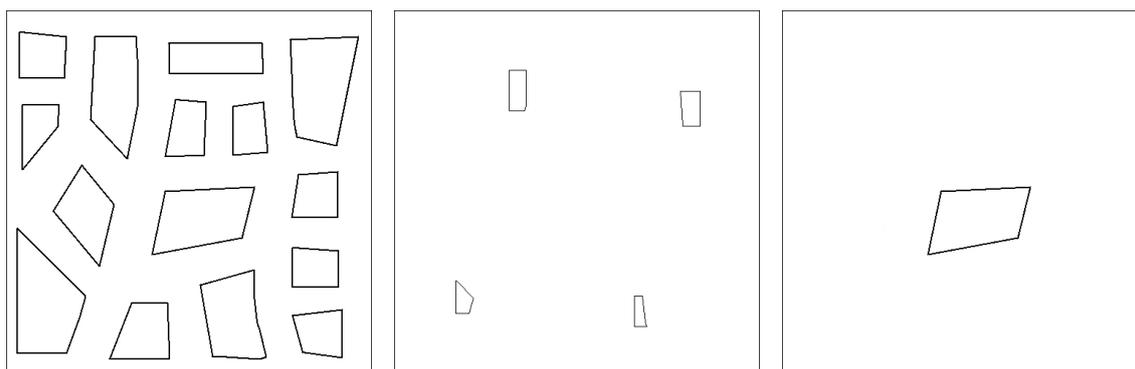
Na modelagem realizada foram definidas 6 entidades, as quais são apresentadas a seguir:

- as **quadras** de uma determinada área da cidade são modeladas como agentes fixos e possuem a forma de polígono. A posição de cada agente é definida pelos dados do BDG. Estes agentes não possuem comportamento. Com o posicionamento das quadras é possível determinar a localização das ruas, locais por onde policiais e criminosos podem se locomover;

- as **delegacias** são modeladas como agentes fixos e possuem a forma de polígono. A posição de cada uma é definida pelos dados do BDG e o seu comportamento é criar, de acordo com uma certa probabilidade, os agentes policiais. Quando alguma delegacia recebe uma mensagem de um agente policial pedindo reforço, esta probabilidade de criação de um novo agente é incrementada momentaneamente;
- o **presídio central**, local onde os criminosos ficam presos, é modelado como um agente fixo e possui a forma de polígono. A sua posição é definida pelos dados do BDG externo. Este agente não possui comportamento;
- os **criminosos** são modelados como agentes móveis e possuem o formato de ponto. Estes agentes iniciam em posições aleatórias das ruas periféricas da área que está sendo representada e se movimentam vagando pelas ruas até que são presos pelos agentes policiais. Se um criminoso for capturado e enviado para o presídio central, ficará lá até o final da simulação;
- os **policiais** são modelados como agentes móveis e possuem o formato de ponto. Iniciam sempre dentro de uma das delegacias. Estes agentes se movimentam pelas ruas capturando os criminosos, objetivando manter a segurança na região. Caso um agente policial perceba a existência de um agente criminoso por perto, faz a captura e o encaminha para o presídio central. Caso o agente policial perceba a existência de mais de um agente criminoso por perto, envia uma mensagem para a sua delegacia pedindo que reforços sejam enviados para as ruas;
- uma entidade sem forma foi utilizada para coletar dados sobre as simulações;

## 5.2. Resultados

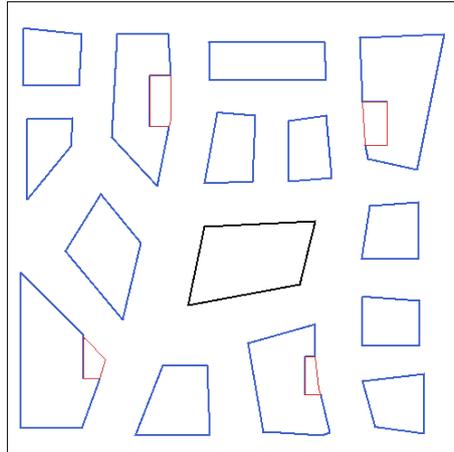
Com o objetivo de facilitar o entendimento dos resultados, na Figura 3 são apresentados os mapas relativos aos dados vetoriais do BDG, utilizados neste estudo de caso. Cabe salientar que, nas simulações, os agentes policiais são representados por pontos escuros (●) e os agentes criminosos por pontos claros (○). No passo de tempo após ocorrer um pedido de reforço, os agentes policiais criados são representados por cruzes (+).



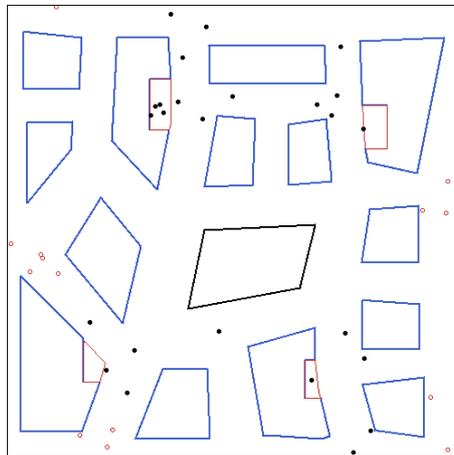
**Figura 3. Do lado esquerdo, o mapa com a localização das ruas e quadras da área que está sendo modelada. Ao centro, o mapa com o posicionamento das delegacias. Do lado direito, o mapa com a posição do presídio central.**

Várias simulações foram realizadas utilizando o modelo apresentando neste estudo de caso. A evolução de uma destas simulações é ilustrada nas Figuras 4, 5 e 6.

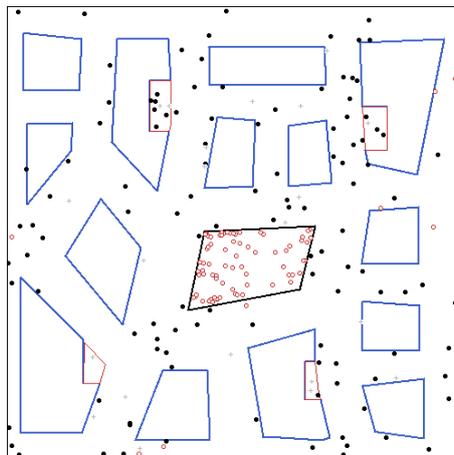
Fazendo uso dos dados coletados durante esta série de simulações, foi gerado um gráfico comparativo sobre a quantidade de cada tipo de agente, apresentado na Figura 7.



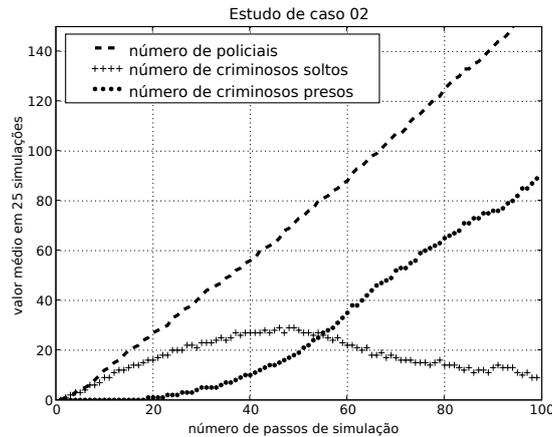
**Figura 4. Representação espacial da simulação em seu estado inicial ( $tempo = 0$ ). Nenhum agente policial ou criminoso foi criado.**



**Figura 5. Representação espacial após alguns passos de simulação ( $tempo = 18$ ). Os agentes policiais se movimentam principalmente na área central, perto das delegacias, e os criminosos na periferia.**



**Figura 6. Por fim, depois de algum tempo de simulação ( $tempo = 85$ ), os agentes policiais conseguiram capturar quase que totalmente os agentes criminosos.**



**Figura 7. Comparação entre o número de agentes policiais e o número de agentes criminosos, soltos e presos. Este gráfico confirma que os agentes policiais capturaram quase todos os agentes criminosos.**

## 6. Considerações Finais

De forma geral, dentre as contribuições deste trabalho destacam-se:

- **para a área da simulação social:** uma arquitetura de simulação que possibilite uma modelagem espacial robusta das entidades, e conseqüentemente do ambiente, de forma mais próxima da realidade, utilizando estruturas da área de Geoprocessamento, mais precisamente dados vetoriais provenientes de um BDG;
- **para a área da simulação ecológica georeferenciada:** uma arquitetura de simulação que possibilite uma modelagem mais detalhada dos processos antrópicos, capaz de modelar não apenas as ações dos indivíduos, mas também os aspectos da interação social que condicionam as ações dos indivíduos;
- **para a área de Geoprocessamento em geral:** uma abstração para a representação de eventos e processos espaço-temporais dinâmicos, utilizando simulações baseadas em SMAs.

A contribuição final, pode ser descrita como sendo: *prover a estrutura necessária para permitir a utilização de SMAs em simulações de processos sociais e ecológicos que façam uso de modelos geográficos gerados por BDGs; e que os SMAs também possam gerar dados espaciais para serem utilizados pelos BDGs.* Desta forma, tanto os modelos geográficos quanto as simulações baseadas em SMAs podem se beneficiar do acoplamento entre SMA-BDG proposto neste trabalho.

## Referências

- Boero, R. (2006). The spatial dimension and social simulations: A review of three books. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4).
- Castelfranchi, C. (1998). Simulating with cognitive agents: The importance of cognitive emergence. In Sichman, J. S., Conte, R., and Gilbert, N., editors, *Proceedings of the First International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation (MABS '98)*, volume 1534 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 26–44, Berlin, Germany. Springer-Verlag.

- Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, USA.
- Gilbert, N. and Troitzsch, K. G. (1999). *Simulation for the Social Scientist*. Taylor & Francis, Inc., Bristol, PA, USA.
- Gonçalves, A. (2003). Multi-Agentes para Simulação em Sistemas de Informação Geográfica. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Klügl, F., Herrler, R., and Fehler, M. (2006). SeSAM: implementation of agent-based simulation using visual programming. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS '06)*, pages 1439–1440, New York, NY, USA. ACM Press.
- Michel, F., Ferber, J., and Gutknecht, O. (2001). Generic Simulation Tools Based on MAS Organization. In *Proceedings of the 10 European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi Agent World (MAMA'2001)*.
- Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., and Askenazi, M. (1996). The swarm simulation system: a toolkit for building multi-agent simulations. Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico, USA.
- North, M. J., Collier, N. T., and Vos, J. R. (2006). Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 16(1):1–25.
- Okuyama, F. Y. (2003). Descrição e Geração de Ambientes para Simulações com Sistemas Multiagentes. Master's thesis, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Open Geospatial Consortium (2007). OpenGIS Simple Features Specification For SQL Revision 1.1.
- Pedrosa, B. and Câmara, G. (2004). *Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento*. EMBRAPA, Brasília, DF, Brasil.
- Reynolds, C. W. (1999). Steering Behaviors For Autonomous Characters. In *Proceedings of Game Developers Conference*, pages 763–782, San Francisco, CA, USA. Miller Freeman Game Group.
- Santos, M. (1996). *A Natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção*. Hucitec, São Paulo, SP, Brasil.
- Tisue, S. and Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In *Proceedings of the International Conference on Complex Systems (ICCS2004)*, pages 16–21.
- Torrens, P. M. and Benenson, I. (2005). Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Information Science (IJGIS2005)*, 19(4):385–412.
- Vasconcelos, E. and Furtado, V. (2005). Um Simulador Tutorial Multi-Agente para Treinamento da Alocação de Equipes Policiais. In *Anais do XVIII Encontro Nacional de Inteligência Artificial*, pages 892–901, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Worboys, M. F. (1995). *GIS: A Computing Perspective*. Taylor & Francis, London, England.