

Modelagem de sistemas baseada em agentes: alguns conceitos e ferramentas

Tiago França Melo de Lima ^{1,3}
Sérgio Donizete Faria ²
Britaldo Silveira Soares Filho ²
Tiago Garcia de Senna Carneiro ³

¹ Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais
Universidade Federal de Minas Gerais - IGC/UFMG
Belo Horizonte - MG, Brasil
tiagofmlyahoo.com.br

² Departamento de Cartografia – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte - MG, Brasil
fariamaracai@yahoo.com.br, britaldo@csr.ufmg.br

³ TerraLAB – Laboratório Associado INPE/UFOP para Modelagem e Simulação
de Sistemas Terrestres – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Ouro Preto - MG, Brasil
tiago@iceb.ufop.br

Abstract. This paper presents some concepts about the agent-based modeling (ABM) and analyses of some tools that uses this technique of modeling. The ABM is a technique of modeling that has the great advantage the modeling of systems from its constituents units. But the most of tools that use this technique still have a very steep learning curve, which complicates and makes impracticable their use by a greater range of users. The relation facility x flexibility must be evaluated to do the choice of the most adequate tool for each situation. This process of choice is not easy, and have to consider a great number of aspects. This work, under development, presents an introduction to ABM and some initial aspects that contribute to analyze and choice one of the various tools to be used in the process of development agent-based models.

Palavras-chave: modelagem e simulação, agentes, modelagem baseada em agentes.

1. Introdução

Podemos entender um modelo como sendo uma representação simplificada da realidade. O processo de modelar tem como pontos fundamentais: a escolha de um nível adequado de abstração, de forma a considerar informações relevantes ao objeto de estudo e desconsiderar aquelas que não são pertinentes; a linguagem utilizada para representação do modelo. A tarefa de construir um modelo pressupõe um objetivo associado a este propósito, que permitirá definir quais informações são importantes e devem ser representadas e escolher a linguagem mais adequada para descrever tais representações. Um modelo é fruto da visão de mundo do modelador: a escolha das informações e a forma como estas serão representadas são reflexos da individualidade de quem está construindo o modelo, do seu conhecimento do objeto de estudo, de suas experiências pessoais, crenças, e motivações. A simulação de um modelo consiste na execução deste modelo.

De maneira geral, podemos utilizar duas abordagens diante de um objeto de estudo: abordagem reducionista (ou analítica), a qual consiste na síntese ou divisão do objeto em suas unidades constituintes, análise e generalização do entendimento; abordagem holística (ou sistêmica), considera que a análise do fenômeno deve ser feita no seu próprio nível hierárquico devido às propriedades emergentes, fruto das interações entre as diversas unidades complexas e hierarquicamente aninhadas, que constituem o objeto de estudo. As duas abordagens são complementares.

Um sistema pode ser visto como o conjunto de suas partes constituintes e a interação entre estas. Desta forma, o sistema é “maior” que a simples soma das partes. (Bertalanffy, 1975)

Existem diversas tipologias para classificar os modelos. Podem ser baseadas na linguagem utilizada para sua representação, na metodologia adotada, no processo que descrevem, na escala que representam, para citar alguns exemplos.

A modelagem e simulação de sistemas tanto pode ser útil para contribuir para o entendimento do objeto de estudo quanto como procedimento metodológico científico, através da representação de uma hipótese científica.

A modelagem baseada em agentes é uma das metodologias (ou técnicas) disponíveis para construção de modelos, e sua utilização está se expandindo rapidamente em diversos campos da ciência, tais como ciências sociais e ambientais. De acordo com Macal e North (2006) são algumas das razões que têm levado a esta expansão: 1) os sistemas que precisamos analisar e modelar estão se tornando cada vez mais complexos em termos de suas interdependências; 2) alguns sistemas, como o mercado financeiro, sempre nos foram extremamente complexos para serem modelados; 3) atualmente é possível organizar bases de dados num nível fino de granularidade, o que permite realizar micro-simulações; 4) o poder computacional que avança rapidamente.

O artigo tem a seguinte estrutura: a seção 2, Agentes inteligentes, introduz alguns conceitos sobre agentes inteligentes; a seção 3, Modelagem baseada em agentes, apresenta definições e alguns aspectos da técnica de modelagem baseada em agentes, bem como suas vantagens e limitações; a seção 4, Ferramentas para modelagem baseada em agentes, apresenta as ferramentas *Swarm*, *Repast* e *NetLogo*, que suportam a criação de modelos baseados em agentes; a seção 5, Análise das ferramentas, discute acerca de alguns critérios utilizados para analisar as ferramentas apresentadas na seção 4; na seção 6, Considerações finais, são apresentados as conclusões acerca dos resultados parciais obtidos e os trabalhos futuros. Na seção 7 são feitos os agradecimentos e as referências bibliográficas são apresentadas na seção 8.

2. Agentes inteligentes

A definição de agente inteligente (ou racional) tem suas origens no campo da Inteligência Artificial, e apesar dos diversos estudos relacionados ainda hoje não existe um consenso sobre a definição do termo. Conforme Russel e Norvig (2003) um agente é tudo o que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores. Para Macal e North (2005) um agente deve ter as seguintes características: (1) ser identificável – um indivíduo discreto com um conjunto de características e regras que governam seu comportamento e capacidade de tomada de decisões; (2) estar situado – habitar em um ambiente com o qual interage e também no qual interage com outros agentes; (3) ser orientado por objetivos; (4) ser autônomo; (5) ser flexível e possuir habilidade para aprender e adaptar seu comportamento através do tempo baseado em experiências.

Franklin e Graesser (1996) discutem acerca de diversas definições de agentes e enumeram alguns comportamentos apresentados por estes, identificados a partir destas definições: (1) são reativos; (2) são autônomos; (3) são orientados por objetivo(s) / pró-ativos; (4) são temporalmente contínuos; (5) são sociáveis / comunicativos; (6) possuem capacidade de aprender / se adaptar; (7) são móveis; (8) são flexíveis; (9) possuem personalidade. Existem ainda diversos esquemas de classificação de agentes baseados, por exemplo, no tipo de tarefa que executam ou em sua arquitetura.

A própria definição de Franklin e Graesser (1996) satisfaz apenas as quatro primeiras características identificadas: “um agente é um sistema situado em um ambiente e é parte dele,

que percebe o ambiente e age sobre ele, através do tempo, conforme sua própria ‘agenda’ e de modo a refletir suas percepções futuras”. Porém ainda assim é genérica o suficiente para abrigar desde um termostato, contendo um ou dois sensores e ações e estrutura de controle extremamente simples, a seres humanos, com múltiplas e conflitantes orientações, sensores variados, diversas possibilidades de ações e estruturas de controle extremamente complexas e sofisticadas. (Franklin e Graesser, 1996)

O conceito de agente inteligente está relacionado à racionalidade. Segundo Russel e Norvig (2003), a racionalidade é associada a quatro fatores: (1) a medida de desempenho que define critérios de sucesso; (2) o conhecimento prévio do agente sobre o ambiente; (3) as ações que o agente é capaz de executar; (4) a seqüência de percepções do agente até o momento. Estes levam à definição de agente racional: “Para cada seqüência de percepções possível, um agente racional deve selecionar uma ação que se espera venha maximizar sua medida de desempenho, dada a evidência fornecida pela seqüência de percepções e qualquer conhecimento prévio interno do agente”. (Russel e Norvig, 2003)

3. Modelagem baseada em agentes

Assim como não existe uma definição precisa para o termo agente também não há para a modelagem baseada em agentes (MBA). É possível encontrar inclusive algumas variações de nomes, tais como: sistemas baseados em agentes (*agent-based systems*) e modelagem baseada em indivíduos (*individual-based modeling*).

Conforme Bonabeau (2002) na modelagem baseada em agentes o sistema é modelado como uma coleção de entidades autônomas de tomadas de decisão chamadas agentes. No nível mais simples, um modelo baseado em agentes consiste de um sistema de agentes e as relações entre estes. Segundo Aguilar *et al.* (2003) a simulação baseada em agentes se esforça em substituir atores individuais ou grupos de um determinado sistema por representações de software destes atores (ou grupos). Embora diversos em suas aplicações e abordagens, estes modelos tentam criar “micro-mundos” ou *would-be-worlds* em um computador com o objetivo de determinar como as interações e comportamentos dos vários agentes individuais produzem estrutura e padrão (Berry *et al.*, 2002). Para Bonabeau (2002), a MBA é mais uma forma de pensar que uma tecnologia, onde um sistema é descrito pela perspectiva de suas unidades constituintes.

De acordo com Macal e North (2006) o processo de se construir modelos baseados em agentes possui alguns aspectos únicos devido ao fato de se tomar por base a perspectiva de agentes ao invés da perspectiva baseada em processos da modelagem e simulação tradicional. Os autores enumeram os seguintes passos gerais para a construção de modelos de agentes: 1) agentes – identificar os tipos de agentes e seus atributos; 2) ambiente – definir o ambiente no qual os agentes irão habitar e interagir; 3) métodos de agentes – especificar os métodos pelos quais os atributos dos agentes serão atualizados em resposta às interações entre agentes e entre agentes e ambiente; 4) interações de agentes – adicionar os métodos que controlam que agentes interagem, quando interagem, e como interagem durante a simulação; 5) implementação – implementar o modelo de agentes em um sistema computacional.

Algumas situações em que a MBA pode oferecer vantagens sobre abordagens tradicionais e é portanto benéfico pensar em termos de agentes são citadas por Macal e North (2006): quando há uma representação natural como agentes; quando há decisões e comportamentos que podem ser definidos discretamente; quando é importante que os agentes se adaptem e mudem seu comportamento; quando é importante que os agentes tenham relacionamentos dinâmicos com outros agentes, e os relacionamentos possam ser formados e dissolvidos; quando é importante que os agentes formem organizações, e a adaptação e aprendizagem são importantes no nível de organização; quando as mudanças estruturais no processo devam ser um resultado do modelo, ao invés de entrada do modelo, dentre outras.

3.1 Vantagens e limitações da modelagem baseada em agentes

Segundo Bonabeau (2002) a modelagem baseada em agentes apresenta alguns benefícios em relação a outras técnicas de modelagem, pois: (1) permite capturar fenômenos emergentes; (2) fornece uma descrição natural de certos tipos de sistemas; (3) é flexível. O autor identifica ainda algumas situações potenciais para utilização da MBA, tais como: quando os agentes possuem um comportamento complexo, incluindo aprendizagem e adaptação; quando as interações entre os agentes são complexas, não-lineares, descontínuas; quando a topologia das interações é heterogênea e complexa; quando o sistema é descrito de forma mais natural através de atividades ao invés de processos; dentre outras.

Um desafio, comum a todas as técnicas de modelagem, é que o modelo deve ser construído num nível correto de descrição dos fenômenos, usando uma quantidade adequada de detalhes, para servir ao seu propósito. Outro desafio envolve a utilização da MBA nas ciências sociais, que geralmente envolvem seres humanos com comportamentos potencialmente irracionais, de escolhas subjetivas e psicologia complexa, aspectos difíceis de quantificar, calibrar e muitas vezes justificar. Outro desafio está relacionado à própria definição da MBA, a qual trata um sistema no nível de suas unidades constituintes, o que exige elevado poder computacional e tempo para simulação do modelo, conforme a escala e a complexidade modelada.

4. Ferramentas para modelagem baseada em agentes

Conforme Castle e Crooks (2006), em geral existem dois tipos de sistemas disponíveis para o desenvolvimento de modelos baseados em agentes: *toolkits* e softwares.

As *toolkits* fornecem um *framework* conceitual que permite organizar e projetar modelos baseados em agentes através de bibliotecas de software que incluem rotinas e funcionalidades projetadas especificamente para MBA. A utilização de *toolkits* reduz a carga de trabalho com a programação de partes que não são específicas da modelagem/simulação, tais como: interfaces gráficas com usuário (GUI – *Graphical User Interface*), importação e exportação de dados, visualização e exibição do modelo. Porém, apresenta como desvantagens o grande esforço inicial para compreender como implementar modelos e entender a linguagem de programação utilizada pela *toolkit*. (Castle e Crooks, 2006; Gilbert e Bankes, 2002)

Os softwares simplificam o processo de implementação, por geralmente não exigirem a utilização de linguagens de programação de mais baixo nível, tais como Java e C++. Ainda, conforme Castle e Crooks (2006), os softwares são úteis para o desenvolvimento rápido de modelos básicos ou protótipos. Como desvantagens, os modeladores ficam restritos à concepção de modelos especificados pelo software, além de se limitarem às funcionalidades fornecidas por ele (ao contrário das *toolkits* que permitem a extensão de suas funcionalidades e integração de novas ferramentas).

Gilbert e Bankes (2002) fazem um paralelo entre o desenvolvimento de ferramentas para modelagem baseada em agentes e softwares de estatística. Inicialmente os modelos foram desenvolvidos utilizando-se linguagens de programação de propósito geral, tais como Java e C++. O passo seguinte foi o surgimento de diversas bibliotecas padronizadas que permitiram a reutilização e redução de custos de desenvolvimento – estágio equivalente às *toolkits* definidas por Castle e Crooks (2006). O avanço na computação estatística foi o desenvolvimento de coleções de rotinas combinadas em uma interface de usuário comum e padronizada. O surgimento e evolução de softwares para a MBA ocorreu de forma semelhante.

As ferramentas *Swarm* (Minar *et al.*, 1996; Swarm, 2008) e *Repast* (Repast, 2008) são apresentadas a seguir como exemplos de *toolkits* para MBA, enquanto o *NetLogo* (NetLogo, 2008), como exemplo de software.

4.1 Swarm

Originalmente desenvolvido no *Santa Fe Institute*, o *Swarm* (Minar *et al.*, 2008) foi uma das primeiras bibliotecas de modelagem baseada em agentes. Atualmente é mantido pelo *Swarm Development Group* (SDG). O *Swarm* é uma plataforma para MBA que inclui: (1) um *framework* conceitual para projetar, descrever e conduzir experimentos em MBA; (2) implementação de software com diversas ferramentas úteis; (3) uma comunidade de usuários e desenvolvedores que compartilham idéias, softwares e experiências. (Swarm, 2008)

No *Swarm* a unidade básica de simulação é o *swarm*. O *swarm* representa um modelo completo, composto de agentes bem como da representação do tempo. O *Swarm* suporta a modelagem hierárquica, onde agentes podem ser compostos por *swarms* de outros agentes em estruturas aninhadas, sendo o comportamento do agente de mais alto-nível definido pelo fenômeno emergente dos agentes interiores ao seu *swarm*. O *Swarm* fornece bibliotecas orientadas a objetos de componentes reutilizáveis para construção e análise de modelos, exibição, e controle de experimentos nestes modelos. Fornece ainda um conjunto completo de bibliotecas para gerenciar agentes, estruturas espaciais para seu ambiente, suas atividades e a agregação destas atividades e a análise dos resultados. O *Swarm* possui uma acentuada curva de aprendizado, sendo necessário possuir experiência em Java (ou Objective C), ser familiarizado com a metodologia de orientação a objetos e ser capaz de aprender algum código *Swarm*. (Aguilar *et al.*, 2001)

4.2 Repast

O *Repast*, acrônimo para *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*, desenvolvido na *University of Chicago*, é uma *toolkit* para modelagem baseada em agentes. Atualmente mantido pela *Repast Organization for Architecture and Development* (ROAD), utiliza de muitos conceitos do *Swarm*. (Repast, 2008).

O *Repast* prevê uma simulação como uma máquina de estado cujo estado é constituído pela coletividade dos estados de seus componentes. Estes componentes são divididos em infra-estrutura e representação. A infra-estrutura é constituída pelos vários mecanismos que executam a simulação, exibem e coletam dados e assim por diante. A representação é o que o modelador constrói, ou seja, o modelo de simulação propriamente dito.

Dentre os diversos recursos do *Repast* podemos citar: inclui uma variedade de *templates* e exemplos de agentes; é inteiramente orientado a objetos; permite aos usuários acessar e modificar dinamicamente propriedades dos agentes, equações de comportamento, e propriedades do modelo em tempo de execução; inclui bibliotecas para algoritmos genéticos, redes neurais, geração de números aleatórios; os modelos podem ser desenvolvidos em diversas linguagens incluindo Java, C#, Visual Basic.Net, Python; possui suporte integrado a sistemas de informações geográficas. (Repast, 2008)

4.3 NetLogo

O *NetLogo* (NetLogo, 2008) é um ambiente multi-plataforma para modelagem de ambientes multi-agentes. É particularmente bem adaptado para modelar sistemas complexos que se desenvolvem ao longo do tempo. Os modeladores podem instruir centenas ou milhares de agentes, todos operando de forma independente. Isto torna possível explorar a conexão entre o comportamento no micro-nível de indivíduos e no macro-nível de padrões que emergem a partir da interação de muitos indivíduos. É simples o suficiente para permitir que estudantes possam facilmente executar mesmo construir suas próprias simulações e avançado o suficiente para servir como uma poderosa ferramenta para pesquisadores de diversas áreas. (NetLogo)

O *NetLogo* possui uma extensa documentação e tutoriais, além de vir acompanhado da *Models Library*, uma ampla coleção de simulações pré-escritas que podem ser utilizadas e modificadas. Estas simulações abordam conteúdos de áreas das ciências naturais e sociais. O

NetLogo é a última geração da série de linguagens de modelagem multi-agentes que teve início com o *StarLogo* (<http://education.mit.edu/starlogo/>). Baseado nas funcionalidades do *StarLogoT* (<http://ccl.northwestern.edu/cm/starlogoT/>), com acréscimo de novos recursos e uma linguagem e interface com usuário redesenhadas. Desenvolvido em Java, pode ser executado na maioria das plataformas (Mac, Linux, Windows etc.). Os modelos podem ser executados como *applets* Java dentro de um navegador web. (NetLogo)

São algumas das características oferecidas pelo *NetLogo*: estrutura de linguagem simples; agentes móveis (*turtles*) caminham sobre uma grade de agentes estacionários (*patches*), criação de links entre *turtles* para construir agregados, redes e grafos de agentes; visualização 2D e 3D do modelo; controle de velocidade de simulação; monitores que permitem inspecionar e controlar os agentes.

5. Análise das ferramentas

Selecionadas as ferramentas de MBA apresentadas nas seções 4.1 a 4.3 foram estabelecidos, principalmente a partir dos trabalhos de Aguilar et al. (2001) e Castle e Crooks (2006), um conjunto de critérios que permitisse fazer análises e avaliações e auxiliar na tarefa de escolher uma dentre as várias ferramentas de modelagem existentes.

Aguilar et al. (2001), em sua revisão sobre ferramentas de simulação baseadas em agentes, estabelece os seguintes critérios de comparação: (1) facilidade de desenvolvimento; (2) flexibilidade; (3) compatibilidade; (4) portabilidade; (5) facilidade para publicar simulações na internet; (6) suporte; (7) performance e escalabilidade; (8) disponibilidade de modelos; (9) facilidades de exibição; (10) exportação de dados.

Castle e Crooks (2006) definem como alguns dos critérios para avaliação: (1) facilidade de desenvolvimento do modelo/uso do sistema; (2) comunidade de usuários; (3) disponibilidade de ajuda ou suporte; (4) comunidade de usuários da linguagem de programação na qual o sistema foi implementado; (5) continuidade do sistema; (6) disponibilidade de modelos de demonstração e/ou *templates* de modelos; (7) documentação; (8) número de agentes que podem ser modelados; (9) graus de interação entre agentes; (10) representação de múltiplos níveis hierárquicos/organizacionais de agentes; (11) mecanismos para sincronizar e ordenar eventos; (12) licença de uso.

Desta forma, foram estabelecidos um conjunto de parâmetros comuns que permitisse avaliar de um modo geral ferramentas de modelagem baseada em agentes e a auxiliar na tarefa de escolher a melhor opção de acordo com as necessidades específicas de cada usuário e situação.

6. Considerações Finais

A modelagem baseada em agentes é uma técnica de modelagem extremamente rica que permite lidar com sistemas complexos a partir de suas unidades constituintes e identificar propriedades emergentes resultantes das interações entre estas. Algumas situações são particularmente úteis para utilização desta técnica: quando lidamos com uma população heterogênea em que cada indivíduo é (potencialmente) diferente; quando os agentes apresentam comportamento complexo, incluindo aprendizagem e adaptação; quando a interação entre os agentes é complexa; quando o espaço é crucial e o posicionamento dos agentes não é fixo. (Bonabeau, 2002)

Apesar de inúmeras vantagens para lidar com problemas complexos a MBA apresenta alguns desafios para o modelador. O primeiro é inerente a toda atividade de modelagem: encontrar o nível adequado de abstração e detalhes que constituem o modelo de modo que este cumpra com seu objetivo. Outra questão de extrema relevância, principalmente para as ciências sociais, é a modelagem de comportamentos complexos, muitas vezes potencialmente irracionais, de escolhas subjetivas e psicologia complexa envolvendo agentes humanos, que

são difíceis de quantificar, calibrar e justificar. Uma outra dificuldade, que não deve ser desconsiderada, está relacionada à limitação computacional. Apesar do crescente poder computacional, a modelagem e simulação baseada em agentes demanda uma capacidade de processamento extremamente elevada, principalmente para sistemas maiores e mais complexos. Isto se deve ao próprio conceito por trás da modelagem baseada em agentes, que define um modelo a partir de suas unidades constituintes.

As ferramentas para modelagem e simulação de sistemas baseadas em agentes foram projetadas inicialmente para facilitar a tarefa de construir modelos. Conforme Gilbert e Bankes (2002), funcionalidades para outras fases do ciclo de vida da modelagem e simulação, tais como validação e manutenção do modelo, ainda são particularmente limitadas. O primeiro suporte para uso do modelo são visualizações do estado do modelo, geralmente através da exibição em *grids* bi-dimensionais, e modestas facilidades para coletar informações de execuções simples do modelo. Funcionalidades como comparar múltiplas execuções do modelo, carregar ou calibrar modelos a partir de dados, gerar automaticamente um grande número de casos a partir de projetos de experimentos, coletar ou analisar estatisticamente resultados de um grande número de experimentos, ainda não são fornecidas pelas ferramentas de modelagem.

Quanto maior a facilidade fornecida pela ferramenta para construir modelos, maiores limitações apresentará em termos de flexibilidade. Quanto maior o nível de abstração utilizado para representação do modelo, ou seja, quanto mais próxima e intuitiva for para o usuário a linguagem utilizada para representação do modelo, menor será o tempo de aprendizado, porém mais restritas também serão as possibilidades de se construir modelos diversos a partir desta linguagem. Desta forma, a melhor ferramenta é a que apresenta melhor relação facilidade x flexibilidade de acordo com as necessidades específicas de cada usuário/problema.

O presente trabalho apresentou uma breve introdução a respeito da técnica de modelagem baseada em agentes, de algumas ferramentas que suportam este tipo de modelagem e simulação, e alguns critérios que ajudam a escolher a melhor ferramenta. O trabalho encontra-se em desenvolvimento, e como resultados parciais já foi possível vislumbrar o quanto será útil o estabelecimento de uma ferramenta que auxilie a analisar, avaliar e escolher uma dentre as várias ferramentas que suportam MBA. As próximas etapas do trabalho incluem incorporar novas ferramentas à análise, criar um conjunto de modelos “genéricos” e implementar estes modelos em cada uma das ferramentas, possibilitando uma análise mais aprofundada das capacidades e limitações de cada uma. Por fim, será implementada e disponibilizada uma ferramenta que auxilie os usuários no processo de avaliar e escolher uma dentre as várias ferramentas de MBA a ser utilizada na criação de seus modelos baseados em agentes.

7. Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

8. Referências bibliográficas

Aguilar, J. A. R., Pinyol, F., Noria, X. e Sanchez, M. L. (2001) “State-of-the-art of software tools for agent-based simulations”, Research Report D30.1.

Bertalanffy, L. Von. Teoria Geral dos Sistemas. Ed. Vozes. 1975.

Bonabeau, E. (2002) “Agent-Based Modelling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS), 99(3): 7280-7287.

Berry, Brian J. L., Kiel, L. Douglas, e Elliott, Euel. (2002) “Adaptive agents, intelligence, and emergent human organization: Capturing complexity through agent-based modeling”.

Castle, C. J. E. e Crooks, A. T. (2006) “Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations”, Working paper, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK.

Franklin, S. e Graesser, A. (1996) “Is it an Agent, or just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents”, Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, Springer-Verlag.

Gilbert, N. e Bankes, S. (2002) “Platforms and Methods for Agent-Based Modelling”, Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA, 99(3): 7197-7198.

Macal, C. M. e North, M. J. (2005) “Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation”, in Kuhl, M.E., Steiger, N.M, Armstrong, F.B and Joines, J. A. (eds.), Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference.

Macal, C. M. e North, M. J. (2006) “Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation Part 2: How to model with agents”, in Perrone, L. F., Wieland, F. P. Lawson, B. G., Nicol, D. M. and Fujimoto R. M., J. A. (eds.), Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference.

Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., Askenazi, M. “The Swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations”. Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe. 1996.

NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Último acesso: julho/2008.

Repast. Repast Agent Simulation Toolkit. http://repast.sourceforge.net/repast_3/index.html, Último acesso: julho/2008.

Russel, S. e Norvig, P. (2003) “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice Hall, USA.

Swarm. Swarm Development Group. http://repast.sourceforge.net/repast_3/index.html, Último acesso: julho/2008.